Vinicius Gomes de Castro

COMPÓSITOS MADEIRA-CIMENTO

um produto sustentável para o futuro

Vinicius Gomes de Castro

COMPÓSITOS MADEIRA-CIMENTO

UM PRODUTO SUSTENTÁVEL PARA O FUTURO

2021

Dados Internacionais da Catalogação na Publicação (CIP)
Editora Universitária (EdUFERSA)

C737c Castro, Vinicius Gomes de.
Compósitos madeira-cimento: um produto sustentável para o Futuro / Vinicius Gomes de Castro. – Mossoró: EdUFERSA, 2021.
129 p. : il.

ISBN: 978-65-87108-11-7

E-ISBN: 978-65-87108-26-1

1. Engenharia florestal. 2. Sustentabilidade ambiental. 3. Material de construção. I. Título.

CDD: 634.9

Bibliotecário-Documentalista
(Mário Gaudêncio, CRB-15/476)

Editora Associada:

Av. Francisco Mota, 572 (Campus Leste, Centro de Convivência) Costa e Silva | Mossoró-RN 59.625-900
+55 (84) 3317-8267 | edufersa.ufersa.edu.br | livraria.ufersa.edu.br | edufersa@ufersa.edu.br

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO

A história dos compósitos formados por madeira e material inorgânico teve início em 1900, na Áustria. Porém, o desenvolvimento tecnológico deste produto sempre esteve intimamente ligado a períodos de crises mundiais. Por exemplo, o primeiro grande salto ocorreu durante a Segunda Guerra Mundial. Materiais tipicamente usados para construção, como metal e madeira sólida, passaram a ser considerados estratégicos e tiveram seu uso severamente limitado. Contudo, ao mesmo tempo que a oferta de materiais diminuía, a demanda de produtos de construção aumentava, pois havia a necessidade de reconstrução de casas após batalhas. Neste cenário, os compósitos madeira-cimento surgiram como alternativa para material de construções temporárias e reconstrução. Uma vez que a madeira utilizada na formação deste material é particulada, resíduos de demolição passavam a ser uma possibilidade de matéria-prima. Além disso, o uso de cimento como agente adesivo possibilitava uma produção de baixo custo quando comparado com outros painéis de madeira reconstituída que utilizavam adesivos sintéticos em suas composições.

E foi justamente a necessidade do uso de adesivos sintéticos na manufatura de compensados que levou ao interesse por compósitos madeira-cimento durante a década de 1970. Com a crise do petróleo entre 1973 e 1979, o mundo notou sua dependência neste produto e passou a procurar por materiais alternativos em praticamente todas as áreas. Nas indústrias de painéis de madeira, esta dependência foi observada principalmente no uso de adesivos fenólicos. E mais uma vez, as pesquisas voltaram sua atenção ao uso da mistura de partículas de madeiras misturados ao cimento como material aglutinante.

As crises, porém, não vieram apenas das indústrias de produtos derivados de madeira. No final dos anos 1990, a Organização Mundial de Saúde considerou a fibra de amianto como um produto cancerígeno em qualquer estágio de produção, transformação e uso. Vários países proibiram então seu uso, e a indústria de concreto que utilizava esta fibra no reforço da matriz cimentícia passou a estudar a possibilidade do uso alternativo de fibras orgânicas.

Durante os anos 2000, a atenção para uma nova crise, desta vez ambiental, tomou as manchetes de todo o mundo após a assinatura do Protocolo de Kyoto. A principal meta do Protocolo foi o controle de emissão de gases que causam o chamado efeito estufa. Entre estes gases, o dióxido de carbono (CO_2) seria o mais crítico. A necessidade de redução da emissão deste gás afeta diretamente a construção civil, uma vez que é responsável aproximadamente por 40% das emissões de carbono (KILBERT, 2013). Assim, a incorporação de madeira em uma matriz de cimento passou a ter um novo atrativo. E desde a virada do século, muito se fala na capacidade das florestas de sequestrar carbono para que haja um equilíbrio com a emissão de gases. Porém, ao contrário da crença popular, a importância do uso de madeira na construção civil não está exclusivamente na sua capacidade de retenção de CO_2. Materiais utilizados em obras continuam a emitir dióxido de carbono durante sua vida útil em serviço. É fato que a madeira retém uma pequena quantidade CO_2, mas muito mais importante do que a retenção é a questão da própria emissão. Por exemplo, a

substituição de materiais como tijolos, alumínio, aço e concreto por madeira pode diminuir a emissão de CO_2 em até 15 vezes a sua capacidade de retenção (BUCHANAN; LEVINE, 1999).

Tais crises podem ser datadas, mas suas causas ainda encontram repercussões até os dias de hoje. As indústrias ainda buscam reduzir sua dependência de combustíveis fósseis, seja devido a fatores econômicos ou ambientais. E uma das alternativas cada vez mais presentes para solucionar tal dilema é a busca por "novos bioprodutos". A inovação de produtos é ainda estimulada pela necessidade de diversificação de negócios, devido à estagnação ou declínio do mercado de produtos florestais tradicionais (JONSSON et al., 2017).

Não há dúvidas que os compósitos madeira-cimento são um destes produtos inovadores com grande potencial para atender às necessidades do mercado moderno. Afinal de contas, estes compósitos são uma classe única de produtos de madeira reconstituída que possui a capacidade de combinar pontos positivos da madeira, como resistência e custo, com pontos positivos do cimento, como estabilidade e resistência à deterioração. Porém, a popularização deste produto ainda encontra algumas barreiras tanto de ordem científica quanto cultural.

No campo tecnológico, um dos maiores gargalos para o desenvolvimento de uma indústria forte de compósitos madeira-cimento é a seletividade das espécies de madeira utilizadas na mistura. Madeira é um material orgânico com composição química heterogênea que pode variar entre espécies, indivíduos e até mesmo dentro de um mesmo indivíduo. Estes componentes orgânicos podem afetar tanto a possível interação entre madeira e cimento, quanto a interações internas do próprio cimento que levam a sua pega e cura, que acaba gerando compósitos com propriedades físicas e mecânicas comprometidas (LATORRACA; IWAKIRI; LELIS, 1999). A compatibilidade entre os materiais gera uma necessidade de se conhecer e entender a formação química de espécies de madeira a serem utilizadas e as reações que ocorrem quando a madeira entra em contato com o cimento. Essa limitação passa a ser ainda mais significante quando se

trata do desenvolvimento desta indústria no Brasil. Ao mesmo tempo que informações químicas sobre as madeiras nativas nem sempre são completas ou acessíveis, também há uma tendência das espécies tropicais serem ricas em extrativos, componente químico considerado um dos principais inibidores da pega do cimento. Porém, esta é uma generalização errônea, uma vez que a inibição é causada não somente pela quantidade, mas também pela composição dos extrativos. Assim, nem toda madeira tropical deve ser prontamente descartada como uma possível matéria-prima.

Embora construções em madeira sejam o padrão em vários países da América do Norte, Europa e Ásia, no Brasil há um certo preconceito em relação do uso deste material em habitações. A origem de tal preconceito é fundamentalmente cultural, pois a colonização do país teve forte influência portuguesa, que por sua vez possui uma tradição no uso de alvenaria. Casas de madeira são geralmente associadas ao risco de incêndio e ao ataque de cupins e fungos, comuns em regiões de clima quente e úmido. A falta de conhecimento da tecnologia da madeira também não ajuda. Madeira é um material fantástico pois apresenta alta resistência mecânica em relação a sua baixa densidade, além do fato de ser um produto renovável e, se bem manejado, ecologicamente correto. Compósitos madeira-cimento são produtos com um atrativo especial para o Brasil. A incorporação do material orgânico, e todas suas vantagens físicas, econômicas e ecológicas, em uma matriz cimentícia gera um produto culturalmente aceitável e resistente à temida deterioração.

1 CIMENTO PORTLAND

O cimento é um material inorgânico de baixa granulometria que, quando misturado com água, forma uma pasta. Por sua vez esta endurece em virtude das reações e processos de hidratação e mantém sua resistência e estabilidade.

A origem do cimento se deu no Egito antigo, mas sua forma moderna chamada de cimento Portland foi patenteada em 1824 pelo inglês Joseph Aspdin. O construtor escolheu esse nome porque o material apresentava uma cor e consistência que o fizeram remeter às rochas da ilha britânica Portland. A primeira fábrica no Brasil ocorreu ainda no século XIX na cidade de Sorocaba, SP, sendo o lançamento do primeiro cimento Portland brasileiro em 1897.

O cimento é formado pela reação térmica da mistura de dois componentes básicos: calcário (carbonato de cálcio) e argila (silicatos de alumínio e ferro). É a partir destas matérias-primas que são extraídos os óxidos necessários para sua hidratação. O carbonato de cálcio ($CaCO_3$) aquecido em alta temperatura forma a cal (CaO) e libera CO_2 para atmosfera. Já da argila são extraídos os óxidos SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3.

Este material é submetido a fornos rotativos, que podem chegar a temperaturas superiores à 1450oC, em um processo chamado de clinquerização ou sintetização. Nesta etapa ocorre uma série de reações físicas e químicas e, ao esfriar, o material aglomera-se em partículas chamadas de clínquer, que podem variar de 2 a 20 mm de diâmetro (figura 1).

Figura 1 - Grão de um clínquer de cimento Portland com uma face cortada e polida

Fonte: Stutzman (2004, p. 958).

O clínquer é então moído com a adição de sulfato de cálcio e outras misturas como, por exemplo, material pozolanico e cinzas. A adição destes materiais serve para regular o tempo de prensa, modificar as propriedades finais do produto e torná-lo mais econômico. Contudo, somente o clínquer é responsável por até 50% da mistura que constitui o cimento.

1.1 Composição

A composição do clínquer é resultado da mistura controlada das matérias-primas de tal maneira que gera uma proporção dos componentes químicos similar para os cimentos do tipo Portland (tabela 1).

Tabela 1 - Porcentagem típica dos componentes químicos do cimento tipo Portland

NOME	FÓRMULAS	PESO (%)
Óxido de cálcio	CaO	61 - 67
Óxido de silício	SiO_2	17 - 24
Óxido de alumínio	Al_2O_3	3 - 8
Óxido de ferro	Fe_2O_3	1 - 6
Óxido de magnésio	MgO	0,1 - 4
Óxido de sódio + Óxido de potássio	$Na_2O + K_2O$	0,5 - 1,5
Trióxido de enxofre	SO_3	1 - 3

Fonte: Glasser (1997, p. 152).

A composição do cimento influencia diretamente suas propriedades tanto em estado fresco quanto endurecido. Assim, existem diverso tipos de cimento com diferentes composições e características. Entre os mais comuns, podemos citar:

a) **Cimento Portland comum -** Pode ser designado como CP I ou CP I-S (sem ou com adição, respectivamente). A norma brasileira exige que a sigla seja acompanhada do número 25, 32 ou 40, que representam a resistência à compressão aos 28 dias de idade, em MPa (NBR 5732, 1991).

b) **Cimento Portland tipo II -** É um cimento composto e mais resistente ao ataque de sulfatos. O tipo do CP II é determinado pela adição (CP II-E, com escória; CP II-Z, com pozolana; e CP II-F, com filer). E, além de ser indicado para praticamente todas as fases de uma obra, o seu custo e disponibilidade o torna muito popular.

c) **Cimento Portland de alto forno -** Conhecido como CP III, contém a adição de 35 a 70% de escória, e por isso apresente maior durabilidade.

d) **Cimento Portland pozolânico -** O CP IV apresenta de 15 a 50% de material pozolânico em sua composição. Apresenta baixo calor de hidratação, baixa porosidade e gera um produto mais resistente a longo prazo quando comparado com cimentos comuns.

e) **Cimento Portland de alta resistência inicial -** É o cimento CP V - ARI. Assim como o CP I, não apresenta adições, porém apresenta uma dosagem diferente na produção do clínquer. A vantagem deste produto é a velocidade em que a resistência máxima à compressão é alcançada. O cimento ARI apresenta alta resistência após apenas 7 dias da hidratação.

A composição química do cimento CP II, assim como a abreviatura normalmente utilizada na bibliografia técnico-científica especializada, pode ser observada na tabela 2.

Tabela 2 - Composição química típica do cimento Portland tipo II

NOME	ABREVIATURA	COMPOSIÇÃO	PESO (%)
Silicato tricálcico	C_3S	$3CaO.SiO_2$	42
Silicato bicálicico	C_2S	$2CaO.SiO_2$	32
Aluminato cálcico	C_3A	$3CaO.Al_2O_3$	6
Ferroaluminato	C_4AF	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	12

Fonte: Stokke et al. (2014, p. 228).

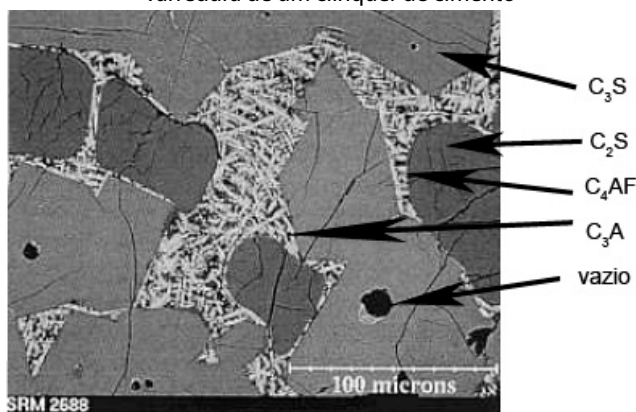
O silicato tricálcico (C_3S) possui grande número de polimorfos, porém com pouca variação de sua estrutura cristalina. É um constituinte essencial do clínquer e representa um papel importante na resistência mecânica do cimento (ODLER, 2003). Embora o silicato bicálcico (C_2S) ocorra no cimento Portland em proporções menores do que o C_3S, ele também é considerado um dos componentes principais do clínquer, pois contribuí significativamente nas resistências mecânicas do cimento em idades prolongadas (após 28 dias). O polimorfismo do C_2S é importante na composição química do clínquer (GOBBO, 2003).

Normalmente o polimorfo β é encontrado nos clínquers. Contudo, pequenas quantidades de polimorfos α, α'_H e α'_l podem ocorrer em até 5% (STUTZMAN, 2004).

O aluminato cálcico (C_3A) é formado a partir da cristalização do material que se funde durante o processo de clinquerização. Normalmente tem estrutura cúbica ou ortorrômbica, isolados ou combinados (GOBBO, 2003). Pode ser encontrado preenchendo as áreas entre os ferroaluminato (C_4AF) e contém até 7% dos óxidos. É altamente reativo com água (STUTZMAN, 2004).

O ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) é considerado de baixa reatividade hidráulica e tem como propriedade principal imprimir resistência à corrosão química do cimento. É o C_4AF o responsável pela coloração tipicamente acinzentada do cimento devido à presença de ferro em sua constituição (GOBBO, 2003).

O C_4AF e o C_3A são muitas vezes denominados como a matriz do cimento, uma vez que ocorrem entre os cristais de silicato e aparentemente são responsáveis por sua adesão (STUTZMAN, 2004). A figura 2 apresenta uma imagem produzida por um microscópio eletrônica de varredura de uma possível configuração de um clínquer de cimento.

Figura 2 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura de um clínquer de cimento

Fonte: Stutzman (2004, p. 959).

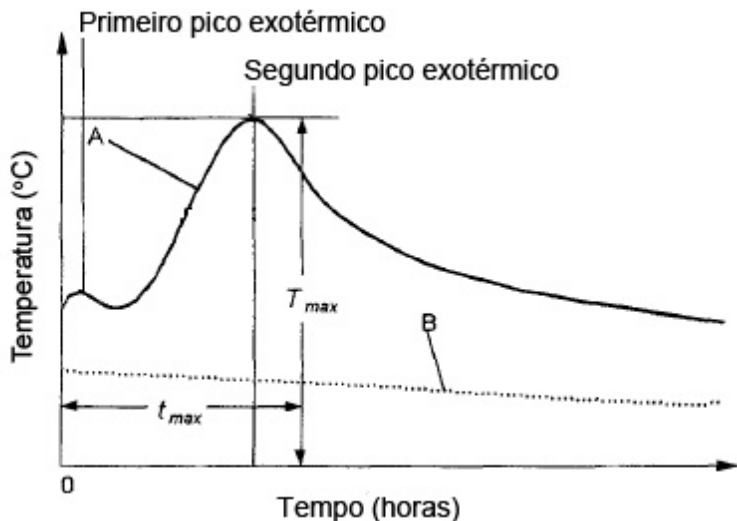
1.2 Hidratação do cimento

Em termos estritamente químicos, hidratação é a reação de um componente anídrico com a água que resulta em um novo componente, um hidratado. Quando se fala em cimento, a hidratação é a reação entre um cimento não-hidratado, ou um de seus componentes, com água, associado tanto com a mudança química e físico-mecânica do sistema, e em particular, com a cura e o endurecimento.

Uma hidratação parcial do cimento pode acontecer graças à umidade do ar, mas, para que seja completa, o cimento deve ser misturado com uma quantidade suficiente de água. Esta taxa de mistura água/cimento (a/c) afeta a reologia (propriedade física que influencia o transporte de quantidade de movimento na mistura), o progresso da hidratação e ainda as propriedades do produto final. Uma taxa a/c entre 0,3 e 0,6 apresenta uma pasta consistente e é chamada de pasta fresca de cimento. Esta pasta cura e endurece à medida que ocorre a hidratação e é convertida para uma pasta endurecida de cimento. O termo "cura" significa que houve uma perda repentina de plasticidade da pasta original e sua conversão para material sólido com uma recém adquirida capacidade de se medir resistência. O termo "endurecimento" significa o desenvolvimento de dureza e resistência que segue a cura da pasta (ODLER, 2003).

A hidratação do cimento Portland é um processo complexo que envolve uma série de reações químicas simultâneas e sucessivas. O processo acontece de forma espontânea com o contato do cimento com a água e é associado com a liberação de calor. O progresso da hidratação pode ser influenciado por uma série de fatores como: a composição e granulometria do cimento, a relação a/c, a temperatura de cura e presença de misturas e/ou aditivos pasta (ODLER, 2003). O tempo e a temperatura para a cura do cimento dependem de sua composição, por sua vez, cada fabricante de cimento possui sua

própria fórmula. Contudo, pode-se considerar que uma boa temperatura de cura varia entre 40o a 80oC e é alcançada entre 6 e 8 horas (SIMATUPANG et al., 1991).

Figura 3 - Representação da curva temperatura-tempo de hidratação do cimento

Legenda: Sendo: A, a curva do cimento; B, a temperatura ambiente; T_{max}, a temperatura máxima de hidratação; tmax, o tempo necessário para atingir a temperatura máxima.
Fonte: Wei et al. (2000, p. 299).

O gráfico que representa a reação exotérmica da pega da hidratação do cimento (figura 3) pode ser dividido em três partes principais, do início quando os componentes são misturados até se alcançar a temperatura máxima: 1. aumento inicial da temperatura (baixo aumento por um curto período); 2. período de dormência (a temperatura não aumenta, podendo até diminuir um pouco); e 3. rápido aumento de temperatura (WEI; ZHOU; TOMITA, 2000a).

A intensa liberação de calor da primeira fase acontece graças à rápida hidratação do C_3S e C_3A. A hidratação parcial do sulfato de cálcio também pode contribuir para esse pico inicial de temperatura (ODLER, 2003). A hidratação do C_2S e C_3S resulta na formação do gel C-S-H ($Ca_3Si_2O_7.3H_2O$) e hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) (EVANS, 2002).

Durante o período de dormência, pouca coisa ocorre, a não ser pela lenta precipitação de gel de C-S-H enquanto há um lento aumento na concentração de Ca2+ e OH- (BACKE; LILE; LYOMOV, 2001).

Após este período de algumas horas (geralmente entre 3 e 12 horas), há o início da fase de cura do cimento, quando pode ser observado um segundo e principal pico exotérmico. Isso acontece devido à hidratação do C_3S e à formação da fase C-S-H (ODLER, 2003). A hidratação do C_3A e C_4AF continua, porém em menor medida. Neste período também pode ser observado o decréscimo da concentração de Ca2+ e OH- devido à formação do trisulfoaluminato de cálcio hidratado, conhecido como etringite (VIEIRA, 2010).

Depois desta fase, a taxa de liberação de calor diminui gradativamente e alcança valores baixos após alguns dias. Com uma quantidade suficiente de água, o processo de hidratação pode continuar até que o cimento original seja totalmente consumido. Porém, para baixas proporções de água-cimento, a reação pode parar graças a falta de quantidade suficiente de água necessária para o processo (ODLER, 2003).

1.3 Efeito do tipo de cimento em compósitos madeira-cimento

O tipo de cimento usado na manufatura de compósitos madeira-cimento pode afetar as propriedades físico-mecânicas finais do produto e, também, sua viabilidade econômica de produção, uma vez que geralmente os compósitos são formados com maiores proporções de cimento do que de madeira.

Macêdo et al. (2011) estudaram a compressão de compósitos produzidos com até 5% de mistura de partículas de Angelim Pedra (*Hymenolobium petraeum Ducke*) e cimentos do tipo CP I e CP II. Foi observado uma tendência de maiores resultados de resistências em compósitos produzidos com CP I após 28 dias de idade. Já Moslemi e Pfister (1987) não observaram diferença entre a resistência à flexão estática e a estabilidade dimensional de painéis feito com CP I ou CP III e madeira de *Pinus contorta*. Os autores atribuíram a homogeneidade dos resultados à composição similar destes dois tipos de cimento.

Azambuja et al. (2014) analisaram painéis particulados madeira-cimento produzidos com madeiras da espécie *Eucalyptus grandis* misturadas com cimento do tipo CP IV - P e CP V - ARI. Os autores encontraram valores estatisticamente diferentes para algumas das propriedades mecânicas. Painéis produzidos com CP IV - P obtiveram maiores valores de módulo de elasticidade, enquanto os que usaram CP V - ARI apresentaram maior resistência à tração perpendicular.

Uma vez que a composição do cimento pode variar entre fabricantes, a simples seleção de uma categoria de cimento Portland não é garantia de resultados homogêneos. Parchen et al. (2016) avaliaram compósitos produzidos com CP II - Z de duas marcas brasileiras diferentes e encontraram comportamentos distintos, mesmo mantendo as outras variáveis iguais.

2 INIBIÇÃO À PEGA DO CIMENTO

Diversos problemas retardam o desenvolvimento da indústria de compósitos madeira-cimento, mas talvez o maior gargalo esteja na seletividade das espécies de madeiras utilizadas. Nem toda madeira é apta para ser utilizada como matéria-prima de compósitos quando há mistura de cimento. Por ser um material orgânico, a madeira possuí uma composição química variável que pode vir a afetar negativamente a pega do cimento e as propriedades físico-mecânicas dos produtos finais. Os componentes inibitórios e o processo ainda não foram totalmente compreendidos. Porém é fato que algumas espécies, como *Pinus contorta*, aderem-se bem ao cimento enquanto outras, como *Larix occidentalis*, apresentam problemas de ligação (MOSLEMI; GARCIA; HOFSTRAND, 1983). Há diversas teorias e modelos que indicam o processo de inibição, e é de fundamental importância compreendê-los para que seja possível minimizar seus efeitos ou, simplesmente, saber quais espécies madeireiras devem ser evitadas em uma indústria de compósitos madeira-cimento.

2.1 Mecanismos da inibição

Mesmo utilizando uma metodologia de produção de compósitos madeira-cimento idêntica, algumas espécies de madeira formam produtos de excelente qualidade enquanto outras literalmente se desfazem (HOFSTRAND; MOSLEMI; GARCIA, 1984). Devido ao fato de a madeira ser um material orgânico, ao ser utilizada na forma de partículas como um agregado do cimento e água, as reações químicas ocorridas pela presença de madeira são desfavoráveis à cura do cimento (BIBLIS; LO, 1968). Segundo Latorraca et al. (1999), os componentes orgânicos afetam tanto a possível interação entre a madeira e o cimento, quanto as interações internas do próprio cimento, o que pode resultar em compósitos de baixa qualidade. O efeito da madeira na pega do cimento é induzido por um conjunto de fatores, incluindo localização geográfica, época de corte, espécie, presença de casca, grau de apodrecimento e extrativos presentes na árvore (HOFSTRAND; MOSLEMI; GARCIA, 1984).

Dentro de uma mesma espécie também pode haver diferentes níveis de inibição quando comparado o uso de cerne e alburno. Foi constatado que, para as espécies de Acácia tropicais da Austrália, o cerne inibe a pega do cimento com maior intensidade do que o alburno. Porém a mesma relação não ocorreu para as espécies *Acacia mearnsii* e *Acacia melenoxylon*, que são espécies de clima temperado e apresentaram um índice de inibição maior na madeira do alburno (SEMPLE; EVANS, 1998). A maior quantidade de alburno também foi responsável por maiores níveis de inibição ao cimento quando misturado com oito diferentes espécies de Eucalipto de dois sítios distintos na Austrália. A provável explicação dada a este fenômeno foi a maior quantidade de polissacarídeos e extrativos fenólicos presentes neste tipo de madeira e tidos como substâncias inibitórias da pega do cimento Portland (SEMPLE; EVANS, 2000).

Hachmi e Moslemi (1989) constataram que algumas espécies possuem baixos teores de extrativos e, mesmo assim, são incompatíveis com o cimento enquanto outras não inibem a cura, embora tenham grande quantidade de extrativo, indicando que a composição química tem importância na inibição da cura.

Na secagem da madeira em forma de partículas, ocorre a migração dos componentes orgânicos para a superfície e formações cristalinas de açucares são desenvolvidas na hidratação do cimento quando a água é acrescentada na mistura. Uma teoria considera que a inibição seria resultado da interferência desses cristais no cimento, afetando possíveis interligações mecânicas do cimento com a madeira e com o próprio cimento (AHN; MOSLEMI, 1980). Por sua vez, o mecanismo da influência negativa que a madeira exerce na hidratação do cimento pode ser explicada por quatro teorias distintas: absorção, precipitação, complexação e controle de nucleação (YOUNG, 1972).

2.1.1 Absorção

Açúcares entram no sistema em volta dos grãos de cimento e criam uma camada impedindo a absorção de água. Assim, a partícula de cimento, sob forças moleculares, perde a capacidade de coesão e coagulação (VAICKELIONIS; VAICKELIONIENE, 2006).

A explicação para a formação desta camada é a ligação entre os grupos carboxilas e hidroxilas e a superfície dos íons Ca2+ e O2- respectivamente. Porém as ligações de hidrogênio não são as únicas responsáveis pelo envolvimento das partículas de cimento, uma vez que também ocorre com elementos como o catecol ou o ácido maleico, que não possuem hidroxilas. Assim, a quelação também passa a ser um mecanismo de absorção importante no processo de inibição da pega do cimento (YOUNG, 1972). A quelação é a reação entre um íon metálico e substâncias de múltiplos sítios chamados de agentes quelantes (SKOOG et al., 2006).

A absorção dos açúcares ocorre inicialmente na hidratação do C_3A e pode até funcionar como um acelerador. Porém se a capacidade de absorção do C_3A não for o suficiente para imobilizar todo o açúcar, este passa a agir como inibidor da hidratação do C_3S (YOUNG, 1972). Esse fenômeno explica porque a baixa concentração de elementos tidos como inibidores não afeta a cura do cimento (SIMATUPANG, 1990; MILLER; MOSLEMI, 1991; YASUDA; IMA; MATSUSHITA, 2002).

2.1.2 Precipitação

Os inibidores orgânicos formam componentes insolúveis quando em contato com o meio alcalino do cimento. Açúcares e ácidos de alto peso molecular seriam os responsáveis pela formação destes elementos que funcionam como barreira para o transporte, solubilidade e precipitação da água durante a cura do cimento (YOUNG, 1972).

Acredita-se que açúcares se combinam com CaO para formar sacarato de cálcio, que leva a aumentar a solubilidade da alumina (Al_2O_3) na solução. A precipitação do gel alumina-sílica sem cálcio ocorre cobrindo partículas de cimento e, assim, retardando a hidratação (THOMAS; BIRCHALL, 1983). Porém, no início da mistura, a absorção é um processo muito competitivo e, embora alguma precipitação venha a ocorrer, seria praticamente impossível distinguir os processos. Se a precipitação fosse o processo principal, não haveria diferença entre a reação com C_3A e C_3S, uma vez que ambos liberam íons de Ca+ na solução. Como a precipitação não explica a aceleração inicial da reação de cura, acredita-se que esse processo apenas exige maior quantidade de água na reação do que propriamente a inibe (YOUNG, 1972).

2.1.3 Complexação

A maioria dos íons metálicos reage com doadores de pares de elétrons para formar complexos (SKOOG et al., 2006). Elementos inibitórios possuem átomos de oxigênio que podem se atrair. Isso indica que

pode ocorrer quelação com íons de metal e que a complexação é um importante mecanismo na inibição. Por exemplo, a adição de grande quantidade de sacarose aumenta a quantidade de íons de Fe, Al e Ca na fase líquida da pasta de cimento. A complexação entre os íons e os elementos inibidores pode vir a ser a causa do aumento inicial da reatividade do cimento e do C_3A. Ao prevenir a precipitação inicial dos produtos da hidratação, mais componentes do cimento irão dissolver antes que a inibição seja bloqueada. Embora haja complexação com íons de Ca, esta não é forte o suficiente para contribuir na saturação de hidróxido de cálcio durante a hidratação de C_3S (YOUNG, 1972).

Estudos sobre a capacidade de inibição da cura de cimento por ação de açúcares não encontraram uma correlação simples entre a capacidade de ligação do cálcio e graus de inibição (THOMAS; BIRCHALL, 1983).

2.1.4 Nucleação

Inibidores orgânicos podem influenciar a morfologia e a quantidade de cristais de hidróxido de cálcio formado em pastas de C_3S. A inibição da nucleação do cristal de $Ca(OH)_2$ ocorre naturalmente na presença de íons de Si presente no cimento. O crescimento do cristal é pausado até que ocorra uma saturação de $Ca(OH)_2$. A adição de elementos orgânicos piora a inibição, pois estes são em maiores quantidades e mais reativos do que os íons de Si. Consequentemente, há um aumento na quantidade de $Ca(OH)_2$ para a retomada do crescimento (YOUNG, 1972). Este processo explica a formação de cristais maiores quando há mistura de aditivos como Ca_2Cl (AHN; MOSLEMI, 1980). Este sal produz rapidamente a saturação de $Ca(OH)_2$ e acelera sua cristalização, sem necessitar da liberação de íons de Ca da estrutura C_3S (YOUNG, 1972).

2.2 Efeito do pH

Alguns autores ainda levantam a questão do efeito do pH dos extrativos presentes na madeira como causa da inibição na pega do cimento. Sabe-se que durante a cura do cimento, hidróxido de cálcio é liberado e o pH da solução passa a ser acima de 12. Geralmente os extrativos de material vegetal são ácidos. Por exemplo, estudos feitos com fibras de coco e sisal (*Agave sisalana*) indicaram pH de 6,3 e 5,3 respectivamente. Assim, o pH da solução é afetado e pode mudar a solubilidade e estabilidade dos elementos da hidratação, tendo um efeito negativo na cura (AGGARWAL; SINGH, 1990).

Em estudo sobre extrativos de *Pinus pinaster* e *Populus* sp., foi indicado que estas espécies possuem pH ácido (entre 4 e 6), ou seja, que contém íons que aumentam a condutividade térmica da solução cimento-madeira. O pH da solução não afeta diretamente a hidratação do C-S-H, mas define seu grau de inibição (BOUSTINGORRY et al., 2005).

2.3 Elementos químicos da madeira que podem causar inibição

A composição química da madeira pode ser dividida em duas categorias: os componentes fundamentais, que são os elementos estruturais formadores da parede celular, e os componentes acidentais, que são os não-estruturais constituído de extrativos e material inorgânico.

Os componentes fundamentais são principalmente compostos por três polímeros: celulose, hemiceluloses e lignina, em uma proporção aproximada de 2:1:1. Estes constituintes somam cerca de 95% da madeira seca. Como celulose e hemiceluloses são polissacarídeos, os carboidratos formam 70% da madeira, enquanto o polímero polifenólico, lignina, foi de 20 a 30%, dependendo da espécie. Os extrativos da madeira, embora não sejam elementos estruturais da madeira, são responsáveis por uma baixa (de 1 a 10%), mas economicamente importante fração da biomassa (YOUNG, 2008).

Tanto a natureza quanto a quantidade dos componentes químicos da madeira afetam a cura do cimento. Tipicamente os componentes inibitórios podem ser divididos em dois grupos: os carboidratos (polissacarídeos) e os componentes fenólicos com compostos de catecol ($C_6H_4(OH)_2$) (YASUDA; IMA; MATSUSHITA, 2002).

2.3.1 Polissacarídeos

Aproximadamente dois terços da madeira são compostos de polissacarídeos (celulose e várias hemiceluloses). Uma estimativa do total de polissacarídeos pode ser obtida ao submetermos a madeira livre de extrativos à deslignificação, que resulta em um resíduo sólido composto de material polissacarídeo (holocelulose) (SJOSTROM; WESTERMARK, 1999).

A celulose é um homopolissacarídeo linear, ou seja, é formada exclusivamente de unidades do monossacarídeo glucose ($C_6H_{12}O_6$) que se repetem conectados por ligações β (1,4) glicosídeas. Uma cadeia de celulose média de uma madeira pode chegar a conter de 7.000 a 15.000 unidades de glucose. E cada uma destas unidades possui três grupos de hidroxilas (-OH) livres que são responsáveis pela estrutura e comportamento físico e químico da celulose.

Já as hemiceluloses são um grupo de heteropolissacarídeos ramificados, o que indica que são formados por diversos tipos de monossacarídeos. Diferente da celulose, as hemiceluloses não são um composto único, na verdade são um agrupamento de estruturas extraíveis em soluções alcalinas. Outra diferença entre a celulose é que as hemiceluloses não formam fibra e possuem um baixo grau de polimerização, sendo constituídas de somente 80 a 200 unidades.

A capacidade de inibição dos polissacarídeos à pega do cimento está relacionada à diminuição da taxa de crescimento dos cristais, que culmina na precipitação da portlandita. Por exemplo, a concentração de éteres de amido é inversamente proporcional à taxa de crescimento. Isso indica que o balanço entre a solubilização de partículas anídricas e

a precipitação dos elementos hidratados é alterada quando se adiciona amido na solução. Por outro lado, se a mistura do amido for atrasada entre 30 e 90 minutos, dependendo da concentração, seu efeito passa a ser desprezível (PESCHARD et al., 2006).

A teoria da absorção das moléculas orgânicas nas partículas anídricas não é válida no caso de cimento misturado com polissacarídeos. Esta afirmação pode ser feita ao se observar que diferentes proporções (de 0,5 a 200%) de dextrina, um polissacarídeo de baixo peso molecular obtido através da hidrólise ácida do amido, não afetaram a taxa de solubilidade do cimento. Estudos complementares sobre a quantidade de Ca2+ e $SO_4$2- disponível durante a hidratação do cimento com polissacarídeos mostram que a mistura não afeta a fase de nucleação do CSH e nem a formação de etringita. Porém, a conversão de etringita para mono-sulfato pode ser atrasada (PESCHARD et al., 2006).

Uma vez que a celulose apresenta de 60 a 70% de sua estrutura cristalina, devido a pontes de hidrogênio regulares e ordenadas, a maior inibição ocorre apenas quando há o início da degradação das cadeias devido ao meio alcalino gerado na mistura com o cimento. Embora em baixa concentração, cinco são os produtos da degradação mais importantes: três ácidos hidroxi-carboxílicos (ácido latíco, glicólico e oxalíco) e dois alcoóis (glicerol e dietil-glicol). Os ácidos são identificados como produtos da degradação da celulose em meio alcalino. Já os alcoóis, em concentração dez vezes menor do que a dos ácidos, são tidos como resultado da síntese de produtos secundários. E, embora a celulose apresente um efeito inibidor na pega do cimento, seus produtos da degradação em meio alcalino mostraram-se desprezíveis na hidratação do cimento, ao contrário do que ocorre com monossacarídeos (POUCHEZ et al., 2006). A mistura de éteres de celulose também não mostrou inibição na formação dos cristais de etringita e portlandita (PESCHARD et al., 2004).

A interação entre cimento e celulose em um compósito, porém, não se restringe a interferências nas reações químicas. Imagens de microscopia eletrônica de compósitos de cimento com reforço de fibras de

celulose mostraram a presença de produtos da hidratação do cimento (etringite e hidróxido de cálcio) no lúmen das fibras. Este fator é conhecido como a mineralização da celulose. Esse fenômeno pode ser positivo na formação do compósito, uma vez que pode levar a um aumento na adesão entre o material orgânico e inorgânico. Por outro lado, a mineralização das fibras leva a seu enfraquecimento, o que compromete as propriedades do compósito a longo prazo (TONOLI et al., 2009).

Por sua vez, o uso de um isolado de hemiceluloses pode exibir uma completa inibição da pega do cimento. A mistura deste material apresentou a temperatura da reação exotérmica constante durante 30 horas (WEI et al., 2002). Hemiceluloses são amorfas, ramificadas e, por definição, solúveis em solução alcalinas. Por isso, a decomposição das hemiceluloses forma frações de baixo peso molecular e passa a ser um dos principais fatores na inibição da pega do cimento (BILBA; ARSENE; OUENSANGA, 2003). Assim, para entender o mecanismo de inibição, é importante compreender também o efeito dos monossacarídeos formadores dos polímeros estruturais da madeira.

2.3.2 Monossacarídeos

Os açúcares, ou monossacarídeos, podem ser divididos em dois grupos: redutores e não-redutores. Os açúcares redutores são aqueles que possuem grupos aldeídos e cetonas livres na cadeia, por isso são capazes de sofrer oxidação. Entre eles podemos citar a glucose, lactose, maltose e celobiose. Já os não-redutores possuem os grupamentos interligados e tornam-se redutores somente após sofrer hidrólise. São considerados não-redutores a sacarose, α-metil glicosídeo, rafinose e α, α-trealose (THOMAS; BIRCHALL, 1983).

Os açúcares não-redutores que apresentam 5 anéis, sacarose e rafinose, são os maiores inibidores da cura do cimento. Embora em menor grau, os açúcares redutores (glucose, lactose, maltose e celobiose) também apresentaram poder inibidor, ao contrário dos não-redutores α-metil glicosídeo e trealose, que não retardam a cura do

cimento. Essa diferença de inibição pode ser explicada pelo fato de que açúcares redutores reagem facilmente em meio alcalino se degradando e rapidamente unindo-se ao cálcio. Já os não-redutores são inertes em solução alcalina, a não ser que sejam não-redutores de 5 anéis, que possuem uma capacidade intermediaria de formar sais com Ca2+ e OH-, mas com estabilidade suficiente para não se degradar (THOMAS; BIRCHALL, 1983). Após imersão em solução alcalina, pode se observar que açúcares redutores apresentam uma solução amarelada em relação aos não-redutores. Essa coloração comprova a alta degradação dos açúcares redutores neste tipo de meio. Análise por ultravioleta indica ou formação de ácidos sacáricos ou a enolização dos açúcares redutores (POURCHEZ et al., 2006).

Análise da fase aquosa da hidratação do cimento apontou um aumento na concentração de Ca2+, OH-, Si, Al e Fe quando misturados com açúcares. Este aumento está diretamente ligado ao efeito inibidor (THOMAS; BIRCHALL, 1983). A capacidade de ligação dos açúcares com o cálcio pode ser comprovada pelo seguinte teste: açúcares são misturados em uma solução de hidróxido de cálcio (6 gramas por litro de água) e, após 48 horas, a concentração de Ca2+ é determinada por cromatografia. Por este teste, pode ser confirmado a alta capacidade de ligação com cálcio dos açúcares: sacarose, rafinose, glucose, maltose, celobiose e lactose (POURCHEZ et al., 2006).

Uma vez que os açúcares possuem apenas uma capacidade moderada de complexação de cálcio e não apresentam nenhuma interatividade detectável com silicatos, presume-se que a inibição da precipitação de C-S-H ocorre pelos processos de absorção e nucleação (THOMAS; BIRCHALL, 1983).

Previte e Grace (1971) também estudaram o efeito inibidor na cura do cimento Portland dos monossacarídeos (glucose, frutose, arabinose, xilose e ribose) e dos dissacarídeos (maltose, lactose e celobiose), além dos açúcares que não se degradam em meio alcalino, o dissacarídeo sacarose e o trissacarídeo rafinose. Eles observaram que o peso molecular dos açúcares é um dos fatores que afeta a hidratação do cimento,

mas não o único, já que há diferença de inibição entre sacarídeos de peso molecular equivalente, como por exemplo, maltose (degradável em meio alcalino) e sacarose (não degradável). Contudo, também foi observada diferença entre inibição entre a glucose e a frutose, sendo que ambas possuem peso semelhante e são degradáveis em meio alcalino. Considerando que a frutose se degrada com mais facilidade do que a glucose, uma nova variável deve ser levada em consideração, a taxa de degradação em meio alcalino.

Outra questão importante a ser considerada quanto ao efeito de açúcares na mistura com o cimento é o fato de que, sob condições alcalinas, alguns sacarídeos, além de sofrerem degradação, podem se rearranjar. Por exemplo, se a glucose for submetida a um meio de hidróxido de cálcio por alguns dias, no final haverá uma mistura de 63,5% de glucose, 2,5% de manose, 31% de frutose e 3% de outras substâncias. A exposição prévia de açúcares ao meio alcalino antes de se misturar ao cimento propriamente dito reduziu o efeito inibidor na maioria dos açúcares solúveis em meios alcalinos. O tempo de exposição também afeta a redução da inibição, porém o maior efeito ocorre logo nos primeiros minutos (PREVITE; GRACE, 1971).

Entre os principais monossacarídeos formadores das hemiceluloses de madeira (manose, glucose, arabinose, xilose, fucose, galactose e rhamnose), apenas um mostrou correlação entre presença em madeiras tropicais e um alto índice de inibição à pega do cimento: a arabinose (CASTRO et al., 2018). Este monossacarídeo é resultante da degradação da hemicelulose arabinogalactana, que, por sua vez, pode ser considerada como um componente inibitório da madeira (YASUDA; IMA; MATSUSHITA, 2002). E a alta porcentagem deste componente na madeira da conífera *Larix occidentalis* pode justificar o seu efeito inibidor ao cimento. Porém, em folhosas, a arabinose geralmente é relacionada à hemicelulose arabinoxilana, que se apresenta em pequenas proporções (menos do que 1%). E mesmo em baixa quantidade, a presença da arabinose formada na degradação em solução alcalina foi o suficiente para afetar a inibição (CASTRO et al., 2018).

O estudo de Juenger e Jennings (2002) sobre a adição de açúcar de cozinha na mistura de cimento e água pode ajudar a compreender o processo de inibição de monossacarídeos na pega do cimento. Eles observaram que a adição de 1% de açúcar chega a atrasar a hidratação do cimento em até 3 meses a uma temperatura de 20oC. Porém, ao aumentar a temperatura da cura, o período de inibição diminui. Outra observação pertinente foi que a mistura contendo açúcar retarda a hidratação, contudo, uma vez que a reação ocorre, ela é mais eficiente do que a do cimento puro. Ou seja, após 10 dias depois da mistura, o tratamento com açúcar tem maior grau de hidratação do que o puro.

Este período inicial de inibição que termina repentinamente é chamado de "barreira de inibição". A barreira pode ser quebrada quando o número de sítios de nucleação é maior do que o de açúcar presente, então os sítios futuros não são contaminados. O maior grau de hidratação após a quebra da barreira pode ser causado pelo excesso de íons na solução que podem hidratar nos cristais já formados. O crescimento de cristais heterogêneos exige menos energia do que os homogêneos, por isso a formação é mais rápida. As propriedades dos cristais de C-S-H também são afetadas pelo açúcar. Cristais formados após o período de inibição têm a tendência de serem menos densos e com maior área superficial (JUENGER; JENNINGS, 2002).

2.3.3 Lignina

Lignina é o terceiro polímero estrutural da parede celular da madeira. Porém, diferente dos outros dois, não é um polissacarídeo. Também não é linear como a celulose, ou ramificado como as hemiceluloses. A lignina apresenta uma estrutura que conecta seus monômeros (álcool cumárico, álcool coniferílico e álcool sinapílico) através de diferentes ligações químicas em uma rede. O tipo de lignina é definido pelos teores dos diferentes monômeros e vária se a madeira é originada de conífera ou folhosa.

Por não ser constituída de açúcares, o efeito da lignina na hidratação do cimento é muitas vezes ignorado, sendo que alguns autores já chegaram a afirmar que a lignina não possui capacidade inibitória (BIBLIS, 1968). Contudo, em análise da degradação térmica da mistura de cimento com um isolado de lignina, não apresentou o pico por volta de 500oC. Este pico está relacionado com a desidratação da fase CaO. H_2O (BILBA; ARSENE; OUENSANGA, 2003).

2.3.4 Extrativos

Extrativos podem ser definidos como componentes químicos que são extraíveis da madeira com vários solventes neutros. São componentes não estruturais da parede celular, de baixa massa molecular, e suas composições variam consideravelmente entre famílias e gêneros de árvores (JANSSON; NILVERBRANT, 2009). Diferentes extrativos são agrupados de acordo com sua solubilidade (hidrofílicos ou lipofílicos) e classificados em três categorias principais: 1- Terpenóides e esteróides; 2- Gorduras e graxas; e 3 - Componentes fenólicos. Geralmente são elementos minoritários, mas podem representar até 40% da madeira seca em algumas espécies (YOUNG, 2008).

Tradicionalmente os extrativos são considerados um dos principais componentes que causam a seletividade da madeira no processo de produção de compósitos madeira-cimento.

Vaickelionis e Vaicklioniene (2006), através de suas análises por raio-X, concluíram que a inibição da pega do cimento estaria mais correlacionada com a quantidade total de extrativos presentes nas madeiras do que em sua composição química. Contudo, essa teoria é contestada por diversos autores, que indicam que diferentes classes de extrativos possuem diferentes capacidades inibitórias. Por exemplo, acredita-se que terpenos não inibem a pega do cimento, porém o tanino, especialmente os hidrolisáveis, possui grande importância no processo, assim como os ácidos orgânicos de peso molecular alto, como os ácidos alifáticos (BIBLIS, 1968). Justamente os taninos, junto

com as hemiceluloses, são considerados os componentes com maior efeito na hidratação do cimento. É relevante lembrar que a adição de ácido graxo, resina, esterol e terpeno em concentração menor do 1% não chega a afetar a resistência final do compósito madeira-cimento (MILLER; MOSLEMI, 1991).

2.3.5 Materiais inorgânicos

Além dos extrativos, os outros componentes classificados como acidentais, chamados de materiais inorgânicos ou teores de cinzas, também podem influenciar o processo de hidratação do cimento. A composição do teor de cinzas, e sua considerável presença de impurezas inorgânicas, pode ser resultado da manipulação durante a colheita e/ou geração de partículas. Elementos como cálcio e potássio podem afetar a fase inicial da hidratação do cimento. Assim como a presença de sílica também pode resultar em reações podizólicas com o cimento (KARADE; IRLE; MAHER, 2006).

3 AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE MADEIRA-CIMENTO

O termo *compatibilidade*, quando aplicado à área de pesquisa de compósitos madeira-cimento, refere-se ao grau de pega do cimento após misturado com água e com uma quantidade de madeira em forma de partículas. Em geral, se o processo químico do endurecimento do cimento não for afetado, ou apenas levemente afetado, pela presença da madeira, este cimento e esta madeira são considerados compatíveis. Por outro lado, se o endurecimento do cimento é impedido pela presença da madeira, eles são tidos como incompatíveis. Este fenômeno de interação é comumente expresso por diminuir as propriedades físicas do compósito, podendo até criar corpos de prova sem nenhuma integridade física (JORGE; PEREIRA; FERREIRA, 2004). Existem dois métodos amplamente usados para se determinar o tempo de cura do cimento: *Vicat* ou *Gillmore*. Ambos os instrumentos consistem em medir a resistência da pasta de cimento à penetração de uma agulha, sendo que o método de *Gillmore* é determinado pela norma ASTM C 266 (2004). Estes

testes podem ser usados para se medir o efeito tanto de retardantes quanto de aceleradores da pega, porém não são recomendados para o caso de misturas de madeira-cimento. Isso porque a presença de partículas de madeira pode interferir na penetração da agulha (KARADE; IRLE; MAHER, 2003).

Porém, alguns pesquisadores ainda utilizam este método para determinar a compatibilidade da madeira de forma indireta. Ao invés de se testar o grau de inibição causado pela partícula de madeira, neste caso é analisada apenas a capacidade de pega do cimento quando misturado com a água resultante do processo de extração da madeira. Desta maneira o instrumento de *Vicat* pode medir a variação no tempo de cura do cimento afetado pelos extrativos da madeira sem a interferência física da partícula (VAICKELIONIS; VAICKELIONIENE, 2006). Contudo, este método passa a considerar o apenas efeito inibitório dos extrativos hidrossolúveis, ignorando outros componentes importantes no mecanismo de inibição à pega do cimento, como a hemicelulose e os taninos.

Diversos pesquisadores já desenvolveram métodos matemáticos para classificar diferentes espécies de madeira de acordo com o grau de inibição quanto à pega do cimento (SANDERMANN; KOHLER, 1964; WEATHERWAX; TARKOW, 1964; WEATHERWAX; TARKOW, 1967; HOFSTRAND; MOSLEMI; GARCIA, 1984; MOSLEMI; LIM, 1984). Através destas equações, o chamado índice de inibição compara um ou mais características da hidratação do cimento, como temperatura de hidratação, tempo para atingir a temperatura máxima e a relação da curva da temperatura máxima/ tempo de hidratação do cimento puro e a mistura cimento madeira (OYAGADE, 1994).

Porém, embora a mistura da madeira com o cimento possa reduzir a intensidade e atrasar o alcance da temperatura máxima da reação, um detalhe deve ser observado na elaboração de um índice para medir a compatibilidade. Quando o cimento é misturado com a madeira, a temperatura da primeira fase da reação pode ser superior à da reação do cimento puro com a água. Isso possivelmente ocorre pela presença

de extrativos em certas madeiras que aceleram a hidratação do C_3A. Assim, o primeiro pico deve ser ignorado, e apenas o pico principal referente à formação do C-S-H deve ser considerado (WEI; ZHOU; TOMITA, 2000a).

3.1 Método Sandermann- Kohler

Sandermann e Kohler (1964) foram pioneiros na criação de um método para avaliar madeiras potenciais no uso das indústrias de compósitos madeira-cimento. Eles estudaram 99 diferentes espécies de madeira e as classificaram baseados apenas em um parâmetro: a temperatura máxima de hidratação (T_2). A classificação sugerida pelos autores divide as madeiras em três classes: adequada (T_2 maior do que 60oC), intermediaria (T_2 entre 50o e 60oC) e não adequada (T_2 menor do que 50oC). O método pode ser considerado simplista, por ignorar todas as outras características da curva de hidratação do cimento, porém não necessariamente deve ser descartado. Estudos já encontraram uma correlação linear entre temperatura máxima da reação e resistência à compressão de compósitos madeira-cimento (WEI et al., 2003).

Porém, uma vez que as características do cimento, como a idade, condições de armazenamento ou o tipo, apresentam temperaturas de reação diferentes independente da mistura com partículas de madeira, Vilela e Du Pasquier (1968) adaptaram o método através da fórmula:

$$(A) = \left(\frac{T_m - T_a}{T_M - T_a} \right) \times 100$$

Legenda: Em que: A, índice de compatibilidade (%); Tm, temperatura máxima da mistura com madeira (oC); TM, temperatura máxima da reação cimento-água (oC); Ta, temperatura ambiente (oC).

As espécies de madeira passam então a ser classificadas em relação aos valores de *A*: acima de 80% são consideradas de compatibilidade muito boa; com valores entre 60 e 79% como boa; entre 50 e 59% como

regular; e abaixo de 50% como ruim. Este método passou a observar outra variável, que foi o tempo que se levou para se atingir o pico de temperatura, embora este não chegue a ser contabilizado. O valor de *A* só deve ser considerado para misturas madeira-cimento que atinjam a temperatura máxima da reação, no máximo, dentro do dobro do tempo alcançado pelo cimento puro, que pode variar entre 9 e 12 horas (VILELA; DU PASQUIER, 1968).

3.2 Método Weatherwax-Tarkov

Outro dos métodos pioneiros de compatibilidade foi sugerido por Weatherwax e Tarkow (1964). Ao invés de se analisar a temperatura máxima da reação, os autores sugeriram a criação de um índice que consideraria apenas o tempo em que a mistura madeira-cimento atingiria tal temperatura em relação ao tempo medido para a mistura apenas do cimento puro e água.

$$(I) = \left(\frac{t_0 - t_s}{t_s} \right) \times 100$$

Legenda: Em que: *I*, índice de compatibilidade (%); t0, tempo para a mistura madeira-cimento atinja a temperatura máxima de hidratação (h); ts, tempo para que o cimento puro atinja a temperatura máxima de hidratação (h).

Espécies cujo tempo para atingir a temperatura máxima é abaixo de 15 horas são consideradas potenciais madeiras para a produção de bons compósitos, enquanto, se o tempo superar 20 horas, é recomendado tratamento (HOFSTRAND; MOSLEMI; GARCIA, 1984). Contudo, nem sempre pode ser encontrada a correlação entre o tempo para se atingir a temperatura máxima e a resistência à compressão do produto final (WEI et al., 2003).

Uma variação ainda mais simples deste método foi sugerida, sendo a inibição indicada pela razão simples entre o tempo da cura da mistura e o tempo da cura do cimento. Resultados entre 1 e 1,5 são

considerados adequados, entre 1,5 e 2 são aceitáveis, ou seja, pré-tratamento é recomendado, e resultados acima de 2 são tidos como inibitórios (OLORUNNISOLA, 2009).

Levando em consideração ambos os elementos dos métodos Sandermann-Kohler e Weatherwax-Tarkow, as espécies de madeira podem ser classificadas em três diferentes categorias de compatibilidade de acordo com a temperatura máxima (T_{max}) e o tempo para atingi-la (t_{max}) (WEI; ZHOU; TOMITA, 2000a).

1 - Espécie de baixa inibição: T_{max} > 50oC e t_{max} < 10 horas
2 - Espécie de inibição moderada: T_{max} > 40oC e t_{max} < 15 horas
3 - Espécie de alta inibição: T_{max} < 40oC e t_{max} > 15 horas

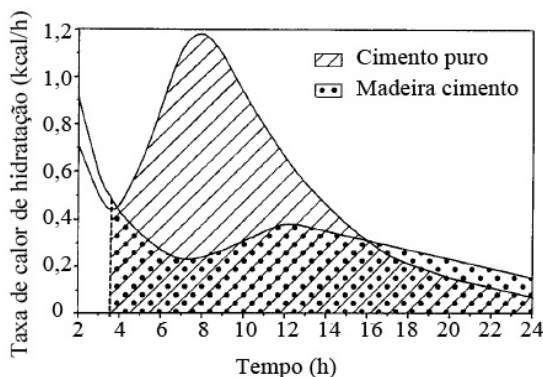
3.3 Fator-C_A

Contudo, os métodos Sandermann-Kohler e Weatherwax-Tarkow podem apresentar uma falta de consistência quando uma mesma espécie for classificada em categorias diferentes de acordo com o método escolhido. Por exemplo, o *Pinus ponderosa v. scopulorum* foi classificado como compatibilidade intermediária pelo método Sandermann- Kohler, ao mesmo tempo que foi considerado altamente inibitório pelo método de Weatherwax- Tarkow (HACHMI; MOSLEMI; CAMPBELL, 1990). Diversos motivos podem gerar essa discrepância. Por exemplo, se o calorímetro, as condições de hidratação e a relação madeira:cimento:água não forem constantes na elaboração dos índices, a classificação poderá variar.

A amostra de cimento necessita de um volume ótimo de água para sua hidratação. Pouca água resultará em um material difícil de misturar, e água em excesso irá diluir o cimento. Assim, é necessário se determinar que quantidade de água exata deve ser acrescentada na mistura para que as características de hidratação sejam avaliadas. Hachmi,

Moslemi e Campbell (1990) chegaram a um valor aproximado de 0,4 para a relação água:cimento que deve ser utilizada na determinação da compatibilidade.

O gráfico da reação exotérmica do cimento nas primeiras 24 horas também é a base para se determinar o fator-C_A, sugerido por Hachmi e Moslemi (1989). Este fator representa a razão entre a área do gráfico da reação com mistura de madeira e a área do gráfico da reação do cimento com água, sem adição de madeira (figura 4). Para determinação deste fator, é considerado o tempo entre 3,5 h após a mistura e 24h. Assim, a liberação inicial de calor nos primeiros 15 minutos da mistura e o estágio de dormência são ignorados, considerando apenas a cura do cimento propriamente dita. O limite máximo de 24 horas é determinado por razões práticas e considera que este período é o mais importante na cura do cimento sem inibição (HACHMI; MOSLEMI; CAMPBELL, 1990).

Figura 4 - Representação da área sob a curva de hidratação do cimento e da mistura madeira-cimento

Fonte: Hachmi, Moslemi e Campbell (1990, p. 352).

Está área representa a quantidade de calor liberado na reação. Quanto maior o valor do fator, menor seria a inibição apresentada pela madeira. Uma vez que o fator-C_A apresenta correlação com os extrativos em água quente da madeira, este método é recomendado

apenas para espécies com teor de extrativos hidrossolúveis abaixo de 7%. As madeiras podem então ser divididas em 3 classes: compatíveis (fator-C_A acima de 68%), intermediárias, (68% > fator-C_A > 28%) ou incompatíveis (fator-C_A abaixo de 28%) (HACHMI; MOSLEMI, 1989).

Contudo o uso do fator-C_A também gera certa controvérsia. Uma mesma espécie pode apresentar diferentes valores de compatibilidade se forem misturadas ao cimento em forma de pó ou fibra. Por exemplo, quando o pó de madeira de *Acacia mangium* e *Eucalyptus pellita* foi usado na mistura, a madeira de *E. pellita* se mostrou mais compatível com o cimento Portland do que a de *A. mangium*. Contudo, quando o teste foi realizado com fibra das mesmas espécies, houve uma inversão de resultados, indicando a maior compatibilidade da Acácia (SEMPLE; CUNNINGHAM; EVANS, 1999).

Assim, uso de pó de madeira para se determinar a compatibilidade é apto em laboratório, mas pode não ser válido em condições reais de fabricação com diferentes tamanhos de partículas. Mesmo assim, o uso do pó pode fornecer informações valiosas quanto ao possível efeito máximo dos extrativos da madeira, já que, quanto menor a partícula, maior a exposição de área de contato com a pasta de cimento e, por sua vez, maior a quantidade de extrativos poderá reagir na solução (KARADE; IRLE; MAHER, 2003).

Outra limitação do uso do fator-C_A é que ele representa o total de calor gerado, mas não indica a intensidade das reações. A intensidade da cura é importante porque o calor total pode estar distribuído pelo tempo. Por exemplo, a madeira da espécie *Quercus ilex* L. apresentou um fator-C_A de 37%, ou seja, esta madeira poderia ser considerada como moderadamente compatível. Porém, ao observar sua curva de hidratação, há apenas a presença de um pico principal (HACHMI; MOSLEMI; CAMPBELL, 1990). A ausência de um segundo pico indica que não houve a nucleação do C-S-H, responsável pela ligação dos elementos (KARADE; IRLE; MAHER, 2003), o que na prática torna a madeira incompatível com o cimento.

3.4 Índice de inibição (II)

O *índice de inibição* (*II*) foi um aperfeiçoamento dos demais índices que usam as variáveis da curva exotérmica de hidratação do cimento para medir a compatibilidade com a madeira. Utilizando este método, é possível avaliar espécies de madeira diferentes que apresentem tempo de hidratação semelhantes, porém com diferentes efeitos na pega do cimento (HOFSTRAND; MOSLEMI; GARCIA, 1984).

$$(II) = \left(\frac{t_2 - t'_2}{t'_2}\right) \times \left(\frac{T'_2 - T_2}{T'_2}\right) \times \left(\frac{S'_2 - S_2}{S'_2}\right) \times 100$$

Legenda: Em que: *II*, índice de compatibilidade (%); t2, tempo necessário para atingir a temperatura máxima de hidratação do cimento da mistura de cimento, água e madeira (h); t'2, tempo da temperatura máxima de hidratação do cimento da mistura cimento e água (h); T'2, temperatura máxima atingida para mistura cimento água (ºC); T2, temperatura máxima atingida para cimento água e madeira (ºC); S'2, DT'2 /Dt'2 (máximo incremento no período de 1 hora para mistura cimento água); S2, DT2/Dt2 (máximo incremento no período de 1 hora para mistura cimento água madeira).

O cálculo do *II* considera três diferentes informações obtidas da curva de hidratação do cimento: a temperatura máxima alcançada na reação, o tempo que se leva para atingir esta temperatura e, como inovação em relação aos demais métodos, o máximo incremento no período de uma hora de reação. Na prática, esta última variável analisa o ângulo da curva de hidratação, ou seja, qual foi o pico no aumento de temperatura durante a reação.

Dependendo do resultado, a espécie de madeira pode ser classificada em quatro categorias: baixa inibição (*II* <10), inibição moderada (10< *II* < 50), alta inibição (50< *II* <100) ou inibição extrema (*II* >100) (OKINO et al., 2005). Diversos autores já utilizaram este método para classificar a compatibilidade de madeiras com o cimento. Por exemplo, por este método, podem ser consideradas de extrema inibição as madeiras de *Leucaena leucocephala* (LATORRACA; IWAKIRI; LELIS, 1999) e *Swartzia recurva* (CASTRO et al., 2018). Entre as madeiras de alta inibição,

encontram-se as de *Clitoria fairchildiana*, *Euterpe edulis* (LATORRACA; IWAKIRI; LELIS, 1999) e *Fagus sylvatica* (PAPADOPOULOS, 2007). As madeiras de *Cupressus* spp. (OKINO et al., 2005), *Eschweilera odora* e *Manilkara amazonica* (CASTRO et al., 2018) já foram classificadas como de inibição moderada. E, como madeira de baixa inibição, há exemplos tanto de madeira proveniente de florestas plantadas, *Corymbia citriodora* e *Pinus taeda* (LATORRACA; IWAKIRI; LELIS, 1999), quanto de florestas nativas, *Byrsonima crispa*, *Pouteria guianensis*, *Inga alba*, *Inga paraensis* e *Eschweilera coriacea* (CASTRO et al., 2018).

Porém, por mais que o *II* tenha sido uma evolução na determinação da compatibilidade, ainda há críticas sobre a coerência e confiabilidade de seus resultados. Miller e Moslemi (1991) estudaram a correlação entre a resistência do painel cimento-madeira e as características de hidratação de quatro espécies de folhosas e cinco de coníferas. Entre as diversas características, a maior correlação foi encontrada para a temperatura máxima (T) e, mesmo assim, não foi alta para todas as espécies. Como conclusão, eles não recomendaram o uso de parâmetros de hidratação para prever valores de resistência do produto final.

Com o intuito de se buscar uma maior correlação entre os valores e o efeito real da inibição, Pereira et al. (2006) sugeriram uma adaptação para o índice de inibição (*II*):

$$(I^x) = (-1)^{n-1} \times \left(\frac{t_2 - t'_2}{t'_2}\right) \times \left(\frac{T'_2 - T_2}{T'_2}\right) \times \left(\frac{S'_2 - S_2}{S'_2}\right) \times 10^{-4}$$

Assim, *n* (1, 2 ou 3) representa o número de operações dentro dos parênteses com resultados negativos. Se o valor de qualquer operação for negativo, significa que a amostra apresentou melhor resultado do que o cimento puro. O parâmetro (-1)n-1 foi incluído na fórmula para caso um elemento da equação ser negativo, então o índice será negativo e indicará a melhora. Se o parâmetro não for utilizado, e dois dos elementos apresentarem um valor negativo, matematicamente, eles se tornarão positivos, e o índice apresentará um valor mais alto, indicando uma incompatibilidade que não é real.

A desvantagem desta adaptação é que, se um ou dois parâmetros forem positivos, eles tornarão o índice erroneamente mais negativo, já que os outros elementos serão negativos e serão multiplicados juntos. Para estes casos, uma nova adaptação foi sugerida pelos mesmos autores:

$$(I^{+}) = \left(\frac{1}{3}\right) \times \left[\left(\frac{t_2 - t'_2}{t'_2}\right) + \left(\frac{T'_2 - T_2}{T'_2}\right) + \left(\frac{S'_2 - S_2}{S'_2}\right)\right]$$

3.5 Método da maturidade ou índice de compatibilidade (CI)

Um método similar ao usado para se calcular a resistência do concreto curado em alta temperatura também pode ser aplicado para determinação da compatibilidade (KARADE; IRLE; MAHER, 2003). Este método combina o efeito do tempo e temperatura da cura da mistura madeira-cimento e pode ser chamado de método da maturidade, que determina a "idade equivalente" (*te*) e é representado pela seguinte fórmula:

$$t_e = \sum e^{\frac{-E_a}{R} \times \left(\frac{1}{T} \times \frac{1}{T'}\right)} \times dt$$

Legenda: Em que: *te*, idade equivalente; Ea, energia aparente de ativação do cimento (J/mol); R, constante de gás (8,314 J/mol-K);T e T', temperatura da espécie e de referência (em Kelvin).

Pela diferenciação entre o calor total envolvido com respeito à "idade equivalente", a taxa de evolução do calor (Q_e) pode ser calculada. A compatibilidade entre a madeira e o cimento é então indicada ao compararmos essa taxa e a idade equivalente para alcançá-la. A compatibilidade é então proporcional ao Q_e e inversamente proporcional ao *te*. Assim, o índice de compatibilidade (*CI*) proposto pode ser expresso em porcentagem pela equação:

$$(CI) = \sqrt{\left(\frac{Q_{e\max}}{Q'_{e\max}} \times \frac{t'_{e\max}}{t_{e\max}}\right)} \times 100$$

Legenda: Em que: *CI*, índice de compatibilidade (%); Q' emax e *t'e*max, taxa de evolução do calor e idade equivalente máxima referente ao cimento puro; Q emax e *te*max, taxa de evolução do calor e idade equivalente da mistura madeira-cimento.

Uma desvantagem do *CI* é que ele pode sofrer alterações graças à presença de agentes aceleradores, já que considera apenas calor liberado e tempo. Os agentes aceleradores reduzem o tempo de cura e alteram artificialmente o índice. Por exemplo, madeira de alburno de *Pinus contorta* com presença de fungos manchadores tiveram um fator-C_A acima de 100, embora a maioria das características de hidratação (temperatura máxima, taxa de calor máximo e calor total) tenha sido menor do que o cimento puro (PASCA et al., 2010).

Para minimizar o efeito de possíveis aceleradores no cálculo da compatibilidade, foi sugerido uma adaptação do *CI* que também passou a considerar o calor total produzido entre 3,5 e 24 horas após a mistura, a mesma variável utilizada na elaboração do fator-C_A. Este novo fator foi chamado de índice de compatibilidade cruzada, *CX*, e pode ser calculado pela seguinte equação (PASCA et al., 2010):

$$(CX) = \sqrt[3]{\frac{HR_{\max}}{HR'_{\max}} \times \frac{H_{3,5-24}}{H'_{3,5-24}} \times \frac{t'_{\max}}{t_{\max}}}$$

Legenda: Em que: *CX*, índice de compatibilidade cruzada; HRmax, taxa de calor máxima da mistura cimento madeira (Jh-1g-1); HR'max, taxa de calor máxima da reação de cura do cimento puro (Jh-1g-1); H 3,5-24, calor total produzido pela reação cimento madeira entre o período de 3,5 e 24 horas (J); H' 3,5-24, calor total produzido pela reação cimento puro entre o período de 3,5 e 24 horas (J); tmax, tempo para se alcançar o calor máximo da reação entre cimento e madeira (h); t'max, tempo para se alcançar o calor máximo da reação com cimento puro (h).

3.6 Método da calorimetria exploratória diferencia (DSC) ou fator de compatibilidade (FC)

Assim como os métodos CI e CX, foi proposto o método da Calorimetria Exploratória Diferencia (DSC - *Differencial scanning calorimetry*), que também se baseia no calor liberado pela reação. O DSC, além de ser sensível à variação de calor durante o processo de hidratação, apresenta ainda a vantagem de fornecer o fluxo instantâneo de calor livre e de energia total da reação (ALBERTO; MOUGEL; ZOULALIAN, 2000).

O DSC é capaz de obter características importantes da curva de hidratação, como o fluxo máximo de calor e o tempo necessário para alcançá-lo. Pela integração do fluxo de calor pelo tempo do teste, apresenta o total de energia específica da reação. O fator de compatibilidade (F_C) entre a madeira e o cimento é então definido pela fórmula (ESPINOZA HERRERA; CLOUTIER, 2008):

$$(F_C) = \frac{Q_C}{Q_P} \times 100$$

Legenda: Em que: FC, fator de compatibilidade (%); QC, energia total da reação de hidratação da mistura cimento-madeira; QP, energia total da reação de hidratação do cimento puro.

De acordo com o resultado do teste, as madeiras podem ser classificadas em três classes de compatibilidade. Madeiras que apresentam F_C maior do que 75% são consideradas compatíveis (por exemplo as madeiras de *Brachystegia speciformis*, *Amblygonocarpus andongesis*, *Pinus patula* e *Pinus elliottii* (ALBERTO; MOUGEL; ZOULALIAN, 2000); madeiras com F_C entre 45 e 75% são consideradas moderadamente compatíveis (como madeiras de *Pinus banksiana* e *Pinus strobus*); e madeiras com F_C abaixo de 45% são incompatíveis com o cimento (madeiras de *Acer saccharum*, *Betula papyrifera*, *Betula alleghaniensis*, *Fagus grandifolia*, *Larix laricina* e *Populus tremuloides*) (DEFO; CLOUTIER; RIEDL, 2004).

A única desvantagem na utilização deste método é o fato dele ser efetivo apenas para amostras muito pequenas, com cerca de 3 a 10 mg. Como madeira é um material altamente hidrogênio, amostras muito pequenas podem muitas vezes não representar a média da madeira como um todo. Além disso, a alta sensibilidade do aparelho pode levar a uma variação entre repetições de um mesmo tratamento, exigindo um maior número de repetições (DEFO; CLOUTIER; RIEDL, 2004).

3.7 Determinação de resistência física

A maioria dos testes que usam a curva de hidratação como base para se determinar a compatibilidade entre madeira e cimento é realizada em laboratório com amostras em forma de pó. Porém, a granulometria do material pode influenciar o resultado (KARADE; IRLE; MAHER, 2006; CARRION et al., 2008). Quanto menor a partícula, maior é a área superficial e, consequentemente, maior será a quantidade de extrativos livres na mistura que tende a afetar negativamente a pega do cimento (KARADE; IRLE; MAHER, 2006). Por exemplo, a madeira de *Pinus* spp com partículas entre 3 e 5mm apresentou um *II* igual a 0,52, enquanto, ao utilizar partículas entre 2 e 3mm, o valor do índice subiu para 1,82 (CARRION et al., 2008).

Outro problema dos métodos que analisam a curva de hidratação é que não foi encontrada correlação entre a resistência à tração e as propriedades da hidratação (tempo, temperatura e calor) quando se foi estudado o efeito isolado de elementos químicos encontrados na madeira na pega do cimento (MILLER; MOSLEMI, 1991). Acredita-se que a hidratação está relacionada com a taxa de formação do cimento hidratado, enquanto a resistência é função da estrutura do cristal formado.

Considerando que compósitos madeira-cimento geralmente são usados para fins estruturais, então um teste lógico a ser aplicado para se determinar a compatibilidade é o mesmo usado para se determinar a resistência do concreto. Corpos de prova cilíndricos submetidos a testes

de compressão transversal, após 3, 7 e 14 dias do início do processo de cura, mostraram alta correlação com a temperatura máxima de hidratação e baixa relação com o tempo para atingi-la (LEE; HONG, 1986). Assim, o efeito inibidor da madeira pode ser considerado um efeito de retardo, mas que gerará um produto final resistente se respeitado seu tempo próprio de cura. Por exemplo, quando foi avaliado a resistência à compressão de cimento após 3 dias de mistura com extrativos de cinco diferentes tipos de madeira (0,457% do peso do cimento), a resistência das amostras foi cerca de 3,45 vezes menor do que o do cimento curado com água pura. Porém, após os 28 dias de cura, essa diferença foi reduzida para 1,82 vezes menor (VAICKELIONIS; VAICKELIONIENE, 2006).

Para comprovar a baixa correlação entre a resistência final do produto e a fase inicial da hidratação, Blankenhorn et al. (1994) compararam a resistência à compressão de um compósito feito de *Pinus taeda*, espécie conhecida por apresentar baixa inibição na fase inicial da cura, com compósitos de outras quatro espécies. Após 7 dias, o tratamento de *Pinus taeda* obteve valor superior a todos os demais. O mesmo teste, aplicado após 14 dias, mostrou que três das quatro espécies estudadas (*Acer saccharum*, *Populus tremuloides* e *Acer rubrum*) já apresentaram valores de compressão superior ao do *Pinus taeda*. A quarta espécie (*Quercus rubra*) foi a que mais demorou, mas apresentou maior resistência do que a conífera após 58 dias. O valor foi crescente de acordo com o passar do tempo para todas as espécies. Castro et al. (2014) também avaliaram a resistência à compressão de corpos de prova com mistura de cimento Portland e *Eucalyptus benthamii*. A espécie é considerada de baixa inibição e, como consequência, não apresentou diferença entre a resistência após 28 ou 56 dias do início da reação. Contudo, durante esse período, pode ser observada a densificação estatisticamente significativa do compósito, que indica o efeito, mesmo que baixo, do retardo da cura do cimento.

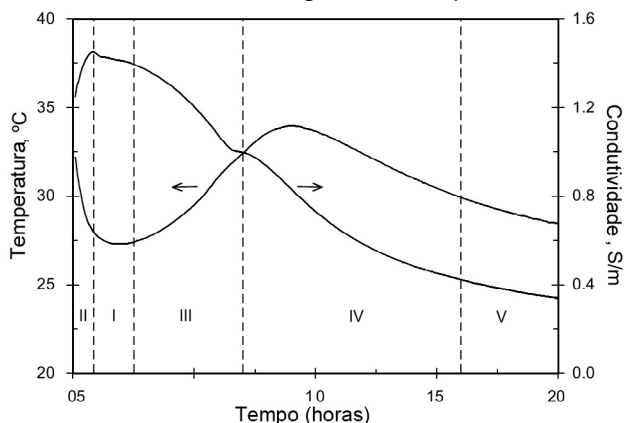
De acordo com a norma brasileira, os corpos de prova cilíndricos devem ter a altura igual ao dobro do diâmetro. O diâmetro deve ser de 10, 15, 20, 25, 30 ou 45 cm, e as bordas circulares extremas do molde devem ser perpendiculares ao eixo longitudinal do molde. O molde deve ser feito de um material que não reaja com o cimento Portland e que permita a fácil desmoldagem. O corpo de prova deve permanecer no molde e protegido das intempéries por 24 horas após produção e depois mantido em câmera úmida à temperatura de 23oC e umidade relativa superior a 95% (NBR 5738, 2008). Já a norma americana recomenda que os corpos de prova devem ser testados após 24 h e 3, 7, 28 e 90 dias. A carga aplicada deve ser de 0,25 MPa/s (ASTM C39, 2004).

No caso da ocorrência de incompatibilidade química entre o cimento e a madeira, a tensão de ruptura é muito baixa (inferior a 1,0 MPa). Um valor aceito pelas empresas de construção civil é acima de 4,0 MPa. Porém, para este método, o valor não depende apenas da natureza dos materiais misturados, mas também da razão entre eles. Dosagens muito elevadas do aglomerante podem mascarar o efeito nocivo à sua pega (BERALDO; CARVALHO, 2004). Por isso, recomenda-se que a classificação da compatibilidade ocorra na comparação da resistência à compressão da mistura madeira-cimento com o valor da resistência de corpos de prova feitos apenas de cimento. Valores abaixo de 10% indicam que a biomassa não tem aptidão para o uso em compósitos de madeira-cimento. Por sua vez, valores acima de 65% indicam materiais vegetais compatíveis com o cimento (SILVA et al., 2002).

3.8 Método da condutividade elétrica

A adição de madeira também altera as propriedades elétricas do cimento, e, como existe uma boa correlação entre a condutividade e a curva de hidratação do cimento, a compatibilidade pode ser determinada pela medição da condutividade elétrica da pasta (SIMATUPANG et al., 1991; KASIM; SIMATUPANG, 1989). Para este tipo de teste, uma corrente alternada deve ser transmitida através da pasta do cimento

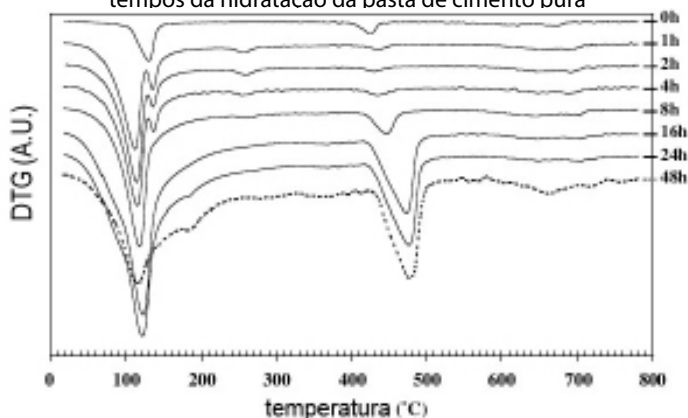
por dois eletrodos. Uma vez que a temperatura afeta a condutividade, é importante que a condutividade da mistura seja corrigida para que possa ser comparada com outros pontos da curva em diferentes temperaturas (BACK; LILE; LYOMOV, 2001). A figura 5 mostra a relação que existe entre a condutividade elétrica e a temperatura durante o período de cura do cimento.

Figura 5 - Comportamento da temperatura e condutividade de uma mistura cimento-água a uma temperatura de 25°

Fonte: Backe, Lile e Lyomov (2001, p. 202).

Assim que o cimento é introduzido, a condutividade aumenta como uma consequência da solubilidade do cimento. Acontece então uma hidratação superficial, que leva a aumento um pouco mais lento da condutividade. Essa taxa de aumento acelera graças ao crescimento no núcleo. Enquanto isso, o cimento continua a se dissolver. A condutividade então chega ao pico devido à portlandite (mineral de hidróxido de cálcio formado durante a cura do cimento) e diminui rapidamente por causa da precipitação (GOVIN et al., 2005).

3.9 Análise termogravimétrica (TGA)

O grau de inibição da madeira sobre o cimento é calculado pela quantidade de portlandite (CH) e carbonato de cálcio ($CaCO_3$) presente na pasta de cimento. Porém, como a termodecomposição da madeira pode vir a afetar o sinal termogravimétrico, está deve ser separada da pasta. Então, as amostras de 25 mg são retiradas durante o processo de hidratação (de 1 a 48 horas) e submetidas a leituras durante a variação de temperatura entre 20 e 800oC (taxa de aquecimento de 10oC/min) (GOVIN; PESCHARD; GUYONNET, 2006). A figura 6 ilustra o comportamento da pasta de cimento durante diferentes tempos de hidratação.

Figura 6 - Análise térmica diferencial (DTG) em diferentes tempos da hidratação da pasta de cimento pura

Fonte: Govin, Peschard e Guyonnet (2006, p. 15).

Como pode ser observado na figura, a curva termogravimétrica da pasta de cimento possui cinco perdas de peso, representadas pelos picos. Os dois primeiros picos, a 115 e 135oC, representam a decomposição do etringita (trissulfoaluminato de cálcio hidratado), gesso (presente em pequena quantidade na composição do cimento Portland) e a evaporação da água. Após 4 horas, o gesso desaparece, mas o pico da etringita é sobreposto com o de C-S-H. A decomposição térmica do CaO.

H_2O e $CaCO_3$ ocorre entre 420-480oC e 600-750oC respectivamente. Ao se misturar madeira de *Populus hybrid* I214, a decomposição do gesso foi mais lenta, embora a produção de etringita tenha se mantido (GOVIN; PESCHARD; GUYONNET, 2006). O mesmo fenômeno foi observado quando se misturou glucose na pasta de cimento. Com maiores dosagens de glucose, a produção de etringita também passa a ser mais lenta, indicando que a quantidade de glucose da espécie usada na mistura é a possível causa da lenta decomposição do gesso e do etringita (COLLEPARDI et al., 1984). Outra possível explicação é que a higroscopicidade da madeira tende a diminuir a quantidade de água livre na solução, o que diminuiria a diluição e consumo do gesso. A falta de íons de sulfato esperada por causa disso seria compensada pelos íons da fibra do *Populus hybrid* I214. Consequentemente, a quantidade de etringita na mistura cimento-madeira passaria a ser igual ou maior do que na pasta de cimento pura (GOVIN; PESCHARD; GUYONNET, 2006).

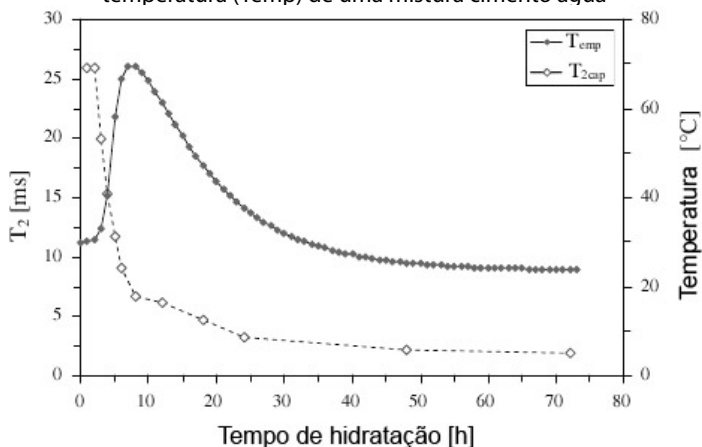
O pico referente à portlandite é menos intenso, ao contrário do pico de $CaCO_3$ que passa a ser bem evidente após 8 horas de reação. Através destes picos, a quantidade dos elementos pode ser calculada e sua variação, comparada com a da pasta de cimento, é considerada o fator de inibição da madeira na cura do cimento (GOVIN; PESCHARD; GUYONNET, 2006).

O uso deste método para a mistura de bagaço e cimento e de isolados de celulose, lignina e hemicelulose e cimento apresentaram ainda um pico extra por volta da temperatura de 300oC. Este pico está correlacionado à degradação dos aditivos (BILBA; ARSENE; OUENSANGA, 2003).

A desvantagem do uso deste método é que o processo de hidratação não é monitorado de maneira contínua. A hidratação deve ser interrompida em tempos pré-determinados para serem examinadas, o que consome muito tempo, além do fato de limitar a pesquisa a uma amostra por vez (RAMACHANDRAN; LOWERY, 1992).

3.10 Relaxometria de RMN

A relaxometria RMN (ressonância magnética nuclear) é uma técnica não-destrutiva que pode fornecer informações sobre a evolução da hidratação da mistura madeira-cimento através da análise da transformação e transferência da água dentro do compósito. A técnica consiste na medição do relaxamento de prótons (T_2), que na prática observa a mobilidade da água no material (CHEUMANI et al., 2011). A figura 7 mostra a correlação entre o relaxamento de prótons e a temperatura no período de cura do cimento.

Figura 7 - Comportamento do relaxamento de prótons (T2) e temperatura (Temp) de uma mistura cimento água

Fonte: Cheumani et al. (2011, p. 1170).

A alta intensidade inicial de T_2 se deve à grande movimentação de água no preenchimento dos poros capilares. À medida que o tamanho dos poros diminui, os valores de T_2 também diminuem. A diminuição dos poros está ligada à formação de produtos da hidratação (C-S-H, portlandite e ettringite). Pode-se observar que após 24 horas, T_2 mantém praticamente constante, pois neste período o tamanho dos poros já está estabilizado, cessando a movimentação da

água de capilaridade e registrando apenas sinais da água dos poros de gel. Através da quantidade de água presente na mistura, pode-se calcular o avanço da hidratação α(t)

$$\alpha(t) = \frac{(w/c)}{(w/c)_0} \times (100 - W_{tot}(t))$$

Legenda: Em que: α, avanço da hidratação (tempo t); (w/c), a relação do peso água/cimento; (w/c)0, a quantidade de água quimicamente ligada em uma grama de cimento na hidratação completa (estimado em 0,23); Wtot(t), quantidade total de água no tempo t

Geralmente o valor de α (28 dias) é de cerca de 70%, e uma hidratação total (α = 100%) pode levar anos. Ao se misturar madeira ao sistema, há um impacto na evolução de α(t). Baseado nesta hipótese, foi desenvolvido um novo índice de compatibilidade medido a um certo tempo de hidratação:

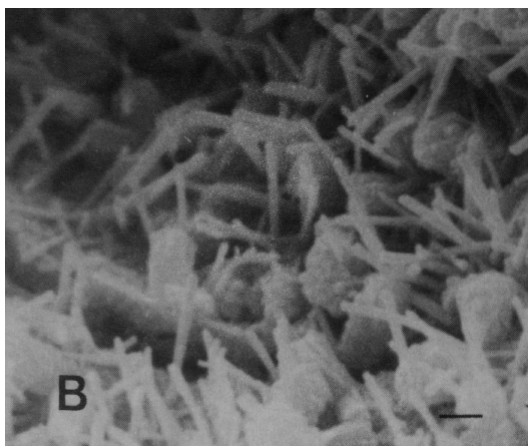
$$I_{NMR}(\%) = \frac{\alpha_{mistura}(t)}{\alpha_{cimento}(t)} \times (100)$$

Legenda: Em que: *INMR*, índice de compatibilidade (%); α mistura, avanço da hidratação da mistura madeira-cimento; α cimento, avanço da hidratação do cimento puro.

Por exemplo, para a mistura de cimento com *Eucalyptus saligna*, que possui um percentual de extrativos em água de 2,8, a evolução de α foi afetada durante os primeiros 3 dias de reação e resultou em um I_{NMR} de 93%. Por outro lado, o uso de madeira de *Afzelia bipendensis* (extrativos em água = 20,5%) afetou a hidratação do cimento completamente, mesmo após 3 dias, resultando em um I_{NMR} de 0% (CHEUMANI et al., 2011).

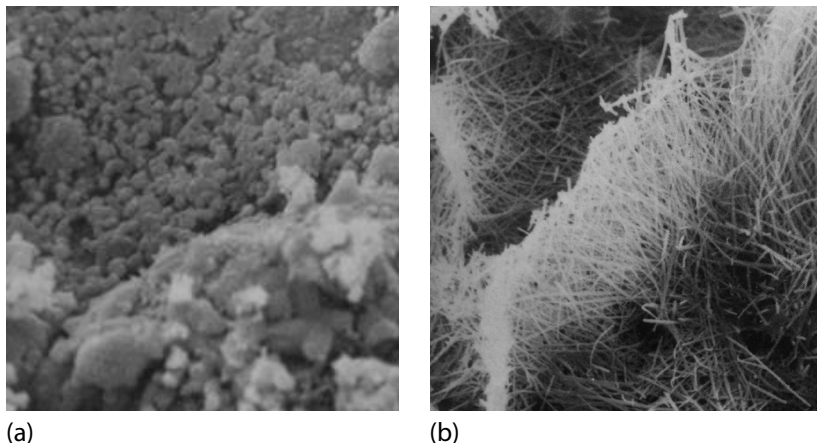
3.11 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A avaliação visual das propriedades da microestrutura da mistura também pode ser usada para determinar a compatibilidade entre a madeira e o cimento. Assim que o cimento é misturado com a água, inicia-se a formação cristais de hidróxido de cálcio resultante da decomposição do C_3S. Ao mesmo tempo, o C_3A também começa formar cristais no formato de agulhas (figura 8), que vão aumentando em quantidade e tamanho com o passar de tempo (AHN; MOSLEMI, 1980).

Figura 8 - Imagem do cimento hidratado no lúmen da célula obtida por Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). A barra da figura representa 1 micrometro

Fonte: Ahn e Moslemi (1980, p. 80).

Em compósitos de madeira de *Abies grandis* e cimento, quando adicionado 0,5% de sacarose à mistura, não houve a formação de cristais, o que afetou as propriedades físicas do painel (figura 9 a). E, quando foi misturado 0,5% de D-glucose, observou-se a formação de uma massa de fibras ao invés dos cristais, massa essa que também não contribuiu na resistência final do produto (figura 9b) (AHN; MOSLEMI, 1980).

Figura 9 - (a) Imagem do cimento hidratado com adição de sacarose;
(b) Imagem do cimento hidratado com adição de D-glucose

(a) (b)

Fonte: Ahn e Moslemi (1980, p. 81).

A estrutura cristalina dos produtos da hidratação poderia auxiliar na ligação através do processo físico, conectando a estrutura da madeira com o cimento, que resultaria em uma melhora da resistência do produto final (AHN; MOSLEMI, 1980). Contudo, essa teoria pode ser contestada, uma vez que a superfície do cimento mantém a forma do lúmen dos traqueídeos lisa, sem nenhuma protuberância no formato de agulhas quando se queima o material orgânico do compósito (FUJII; MIYATAKE, 2003). E isso leva a crer que estes cristais não teriam forças para perfurar a parede celular.

Também foi observada a mesma diferença na morfologia dos cristais, formados na mistura entre cimento com fibra de *Cryptomeria japonica* D. Don (WEI et al., 2004). A imagem da mistura não apresentou os típicos cristais de C-S-H, sendo que a superfície da fibra estava recoberta de grãos de cimento não hidratados e de cristais curtos em forma de fibras.

4 PRÉ-TRATAMENTOS

Embora se reconheça o efeito deletério da madeira na pega e cura do cimento, há formas de minimizá-lo. Reduzir o problema da compatibilidade é o caminho para o desenvolvimento de compósitos madeira-cimento como uma indústria, pois afetaria o gargalo criado pela limitação de matéria prima. Há basicamente duas formas de se trabalhar a seletividade das espécies:

a) Através da extração de componentes químicos presentes na madeira. Como visto anteriormente, é reconhecido que tanto a quantidade quanto a composição de extrativos e açúcares presente na madeira afetam a pega do cimento. Eliminar ou reduzir essas ameaças poderia gerar, na teoria, compósitos de melhores qualidades fisicomecânicas. Porém, a eficiência deste método só poderá ser completa quando se compreender totalmente quais são exatamente os componentes inibidores, para que haja uma extração seletiva e que não afete a estrutura da madeira.

b) A segunda forma é a adição de acelerados da pega do cimento. Neste método, o foco da atenção deixa de ser a compatibilidade da madeira e passa a ser no processo de pega do cimento. Se esse processo pode ser melhorado através de produtos químicos, o efeito inibidor da madeira pode ser sobrepujado, e as propriedades dos compósitos não serão afetadas. O uso de aceleradores é uma prática comum nas indústrias de concreto. Porém, quando há mistura de madeira, certas limitações devem ser levadas em consideração, como a reação entre a madeira e o acelerador.

4.1 Métodos de extração

Os componentes químicos da madeira muitas vezes são classificados de acordo com sua solubilidade, e não de acordo com sua estrutura química. Por exemplo, o termo hemiceluloses envolve um conjunto de polissacarídeos de baixo peso molecular solúveis em solução alcalina. Já extrativos é um termo geral que compreende toda uma gama de materiais orgânicos solúveis em água ou solventes orgânicos, tanto que, para a determinação do chamado extrativos totais de uma madeira, faz-se necessária uma série de extrações em diferentes solventes. Não existe um solvente único que possa retirar todos os extrativos da madeira.

Cada solvente irá conseguir extrair um conjunto de componentes químicos. Por exemplo, éter é um produto relativamente não-polar e é capaz de extrair ácidos graxos, resinas, óleos, esteróides e terpenos. Já o álcool/tolueno é mais polar e extrai a maioria dos extrativos solúveis em éter além dos componentes orgânicos não solúveis em água. A água quente consegue extrair alguns sais inorgânicos e polissacarídeos de baixo peso molecular, como açúcares e amido. Água também remove certas hemiceluloses como a arabinogalactose (PETTERSEN, 1984).

Submeter as partículas de madeiras a diversos métodos de extração antes de utilizá-las na produção de compósitos madeira-cimento é uma prática comum. Contudo, nem sempre essa correlação direta existe. Por exemplo, não foi relatada diferença significativa entre a inibição

da madeira *in natura* ou após extração com substâncias apolares, como etanol e éter etílico, para a espécie *Pinus* sp (PEREIRA et al., 2012), o que indica que cada método de extração deve ser avaliado separadamente.

4.1.1 Água fria

A madeira de *Populus hybrid* possui teor de extrativos solúveis em água fria de 2,15%. Para se chegar a este valor, foram realizadas extrações entre 1 e 24 horas, até que a perda de peso da amostra fosse constante. Pelo método de condutividade elétrica, foi constatado que existe um efeito da água com estes extrativos na pega do cimento. A formação do mineral Portlandite passou a sofrer um atraso de 1,8 horas. Porém, o tempo de imersão da madeira não afetou a curva (GOVIN et al., 2005).

A solução resultante de uma imersão em água de madeira de *Populus hybrid* por 1 hora consiste em vários ácidos carboxílicos com baixa concentração (< 1 mg/l), com exceção dos ácidos fórmico, acético, málico, benzóico e *p*-salicílico (GOVIN et al., 2005). Outro estudo também realizado com extrativos de madeira de *Populus* sp. em água fria mostrou que o único pico presente na análise de cromatografia foi o relativo ao ácido acético. Embora o extrativo tenha afetado negativamente a hidratação do C-S-H, o ácido acético isolado não reproduziu este resultado, o que leva a crer que o elemento inibidor não pode ser detectado no teste (BOUSTINGORRY et al., 2005).

A extração com água removeu 85% dos extrativos retardantes da cura do gesso da *Hevea brasiliensis*. Este extrativo era constituído por uma mistura de aminoácidos (glutamina, arginina, alanina e asparagina) com concentração estimada em 1% (SIMATUPANG; SCHMITT, 1992). Outra pesquisa também analisou o efeito inibidor de extrativos solúveis em água fria de outras 52 espécies de madeira tropical na cura do gesso. Destas espécies, 5 apresentaram inibição extremamente forte, e outras 10 foram consideradas com forte poder inibitório. Entre os extrativos prováveis de inibir a cura do gesso, foram apontados os

compostos fenólicos, incluindo os taninos e aminoácidos hidrolisáveis. Também não foi possível encontrar uma correlação entre o pH da madeira e seu efeito inibidor neste caso (KASIM; SIMATUPANG, 1989).

O efeito da extração com água fria não é constante, pois a constituição química e quantidade dos componentes solúveis varia de espécie para espécie. Por exemplo, a compatibilidade entre o cimento e as madeiras tropicais *Pterocarpus angolensis* e *Erythrophleum suaveoleuns* melhorou consideravelmente após a imersão das partículas por 48 horas. Contudo, o mesmo pré-tratamento não surtiu o efeito benéfico nas espécies *Albizia adianthifolia*, *Sterculia appendiculata* e *Khaya nyasica* (ALBERTO; MOUGEL; ZOULALIAN, 2000).

Outra variável no processo que também depende da espécie vegetal que será usada como matéria prima do compósito é o tempo de extração. Os extrativos solúveis em água fria das fibras de *Cajanus cajan* são quase que totalmente removidos após 3 horas, devido a uma baixa concentração quando comparados aos valores típicos de madeira. Contudo, mesmo em pequenas quantidades, se extrativos desta fibra representam 2% da mistura do cimento, o atraso na pega pode chegar a 130% (AGGARWAL et al., 2008). Já quando a madeira de *Tectona grandis* foi testada, foram necessários 3 dias de imersão para que os extrativos fossem removidos e, assim, a resistência à flexão do compósito madeira-cimento pudesse aumentar de 2,81 para 12 kg/cm2 (SUTIGNO, 2002).

4.1.2 Água quente

Os extrativos solúveis em água quente são apontados como um dos principais inibidores do cimento. Por esta razão é reportado que a extração com água quente tende a ser mais eficiente do que com água fria (AGGARWAL et al., 2008; NA et al., 2014). Por exemplo, os extrativos retirados pelo método de água quente de *Populus simonii* apresentaram uma inibição consideravelmente maior do que os extraídos

de água fria (fator C_A de 26,8 para água quente e 72 para água fria) (WANG; YU, 2012).

Entre os extrativos que afetam a pega do cimento, pode-se destacar a presença de taninos hidrolisáveis. Este composto é caracterizado por uma molécula central de glucose que é esterificada com ácidos gálico ou elágico (SALMINEM et al., 2001). Esses extrativos podem reagir com os íons de hidróxido de cálcio do cimento, levando à inibição de sua cura. A quantidade presente na madeira também é considerada um fator limitante no critério de inibição. Madeiras que apresentam uma quantidade de extrativos em água quente acima de 7% normalmente são consideradas inaptas para a produção de compósitos (HACHMI; MOSLEMI, 1989).

O efeito positivo da extração com água quente não é universal. Partículas de *Eucalyptus grandis* lavadas com água quente não apresentaram diferença significativa sobre a resistência à compressão axial (BERALDO; CARVALHO, 2004). Também não houve melhoras na resistência para as espécies *Acer saccharum* e *Quercus rubra*, sendo que, na verdade, valores de compressão diminuíram à medida que a porcentagem de perda de peso da madeira aumentou devido ao método de extração com água quente (BLANKENHORN et al., 1994). A compatibilidade entre a madeira de *Afzelia quarzenzis* também não foi afetada com tratamentos em água fria ou água quente (ALBERTO; MOUGEL; ZOULALIAN, 2000).

A quantidade e composição dos extrativos varia significativamente não só entre espécies, mas também entre indivíduos de uma mesma espécie, dependendo da idade da árvore, genética e condições de crescimento. Dentro de um único indivíduo também há variação em diferentes partes. Extrativos são mais frequentes na base, galhos ou topo da árvore do que quando comparados à região central do tronco. Também há diferença clara entre alburno e cerne. O cerne é formado por células mortas e por isso o teor de umidade tende a ser muito menor do que do alburno, o que torna a madeira mais vulnerável ao ataque de fungos. Para evitar a deterioração, em algumas espécies,

durante a formação do cerne (antes de secar), as células do parênquima aumentam a produção de resina e componentes fenólicos e, em muitas espécies de folhosas, pode haver a identificação visual pela mudança da cor, originada da formação de polifenóis. A reação principal é que gorduras e outros ésteres são hidrolisados, formando ácidos graxos e esteróis (JANSSON; NILVERBRANT, 2009).

Por isso, o efeito da extração tende a ser diferente entre alburno e cerne. A extração de componentes solúveis em água quente é mais eficiente no combate à inibição à pega do cimento pela madeira do cerne de *Pinus* sp. do que no alburno. Sem tratamento, o cerne é mais inibidor do que o alburno por apresentar maior quantidade de açúcar. O concentrado da extração pode inibir completamente a cura do cimento por até 66 horas (BIBLIS; LO, 1968).

4.1.3 Solvente orgânico: Acetona

O tipo e polaridade do solvente utilizado na extração são fundamentais para solubilizar diferentes compostos químicos da madeira. A maior parte dos compostos extraíveis com acetona possui caráter polar, com apenas uma pequena porcentagem de características lipofílicas (SILVÉRIO et al., 2006).

O uso da extração com acetona na madeira de seringueira (*Hevea brasiliensis*) removeu apenas uma pequena parte (cerca de 5%) dos retardantes da cura do gesso. Dentre os componentes solúveis em acetona, a fração lipossolúvel continha traços de retardantes do gesso. Sendo estes encontrados em elementos neutros e ácidos livres. Na seringueira, os ácidos graxos, livres e estratificados, são basicamente ácidos palmítico oleico e linolênico. A porcentagem de ácido graxo saturado nos ácidos livres foi maior do que na parte neutra (SIMATUPANG; SCHMITT, 1992).

4.1.4 Solvente orgânico: Metanol

Alnus japonica é uma espécie nativa do Japão, nordeste da China e Coréia e conhecida pelo seu efeito inibitório na pega do cimento. Os componentes inibitórios desta madeira foram separados, utilizando-se inicialmente a extração por metanol e na sequência com *n*-hexano, benzeno, acetato de etilo, metanol e 75% de metanol. Isso porque a polaridade destas soluções é diferente. Por consequência, a solução extraída por cada processo também será diferente. Porém, apenas a extração com metanol apresentou uma quantidade significativa de componentes inibitórios. Como este solvente é polar, conclui-se que os extrativos que inibem a cura do cimento possuem alta polaridade. A identificação destes elementos mostrou que os extrativos com mais poder de inibição são as glucoses e sacaroses. Porém, estes mesmos elementos inibitórios afetam pouco a pega do cimento se a quantidade for abaixo de 1% na madeira (YASUDA; IMA; MATSUSHITA, 2002).

Um processo semelhante foi utilizado para se isolar os elementos inibidores de outra espécie japonesa conhecida por sua baixa compatibilidade com o cimento, a *Zelkova serrata* Makino. Os resultados foram semelhantes aos encontrados para a *Alnus japonica*. Os extrativos que inibem a cura do cimento também apresentaram alta polaridade e também não afetaram a cura quando em porcentagens abaixo de 1. A análise da estrutura química do material isolado indica que tanto o C-glicosidio com quatro grupos hidroxila e a cetona α-hidroxilada encontradas na região alifática da molécula podem se ligar aos íons inorgânicos e contribuir para a inibição da pega do cimento (MATSUSHITA; MIYAWAKI; YASUDA, 2003). Inclusive, a baixa concentração de elementos tidos como inibitórios como glucose e tanino já foi apontada como um acelerador na cura do cimento. A cura de cimento Portland com plastificante a 80oC foi acelerada com a mistura de 0,27, 0,55 e 1,09% de glucose, e, em menor intensidade, com a mistura de 0,3, 0,6 e 1,2% de tanino hidrolisáveis (SIMATUPANG, 1990).

4.1.5 Solução alcalina

Soluções alcalinas são capazes de extrair carboidratos de baixo peso molecular. As hemiceluloses são os principais componentes da parede celular que podem ser classificados nesta categoria e são solúveis em soluções concentradas de hidróxido de sódio ou de potássio, ou seja, soluções alcalinas. Porém, deve-se atentar para o fato de que certas hemiceluloses, especialmente de coníferas do gênero *Larix*, são parcialmente extraíveis com água (TELEMAN, 2009). A solubilidade da madeira em meio alcalino também pode indicar o grau de deterioração por fungos ou agentes abióticos, como luz e calor. Isso porque os agentes deterioradores são capazes de quebrar o polímero da celulose e reduzir seu peso molecular.

A fração de extrativos solúveis em meio alcalino também possui influência adicional na cura do cimento. O aumento de componentes solúveis em meios alcalinos diminui o valor de compressão do compósito (SIMATUPANG, 1989). A compatibilidade à pega do cimento também pode ser melhorada quando as partículas utilizadas nas misturas são previamente lavadas em soluções de NaOH. Por exemplo, madeiras de *Milettia stuhmannii* e *Julbernadia globiflora* não apresentaram diminuição do efeito inibitório à pega do cimento quando sofreram extrações em água quente ou fria. Porém, após extração em solução de NaOH (10 g/L ou 1%), apresentaram uma boa compatibilidade (ALBERTO; MOUGEL; ZOULALIAN, 2000). Partículas de *Eucalyptus benthamii*, após 2 horas de imersão em solução de NaOH 1%, também apresentaram melhor compatibilidade no teste de índice de inibição em comparação com outros métodos de extração. Porém, o mesmo pré-tratamento resultou em compósitos com menor valor de compressão axial após 28 dias de cura (CASTRO et al., 2014).

Outra substância, de fácil acesso, que pode ser usada como pré-tratamento da madeira é a cal (hidróxido de cálcio). A imersão da madeira em uma solução calcária foi testada para estudar o efeito na inibição da madeira no cimento. A madeira de *Populus hybrid* submersa em tal

substância por um período de 1 a 24 horas sofreu uma perda de massa entre 2,2 e 3,9%. Quanto maior o tempo de imersão, maior foi a perda de massa. Quando se usa a solução calcária ao invés da água, ocorre, além da retirada dos extrativos, a degradação alcalina de produtos. Pelo teste da condutividade elétrica, a madeira alcalina mudou significativamente o comportamento da hidratação da mistura. Comparado com o cimento puro, o pico de condutividade foi atrasado entre 9,6 a 13,8 horas, dependendo do tempo de imersão da madeira. Assim, pode-se observar que produtos degradados causam mais inibição à hidratação do cimento do que os extrativos (SIMATUPANG; SCHMITT, 1992).

A extração em solução de CaO também foi maior do que a em água para fibras de coco e de sisal (*Agave sisalana*), isso porque, neste meio, a decomposição das hemiceluloses e lignina é mais rápida. A taxa de extração também diminuiu com o tempo, embora ainda fosse presente mesmo após 30 dias. Análise química indicou a presença de carboidratos, aldeídos e hidroxilas nos extrativos de ambos os tipos de fibra. A estrutura das fibras e da madeira são semelhantes, sendo a maior diferença a quantidade e composição da lignina e da hemicelulose. No caso da fibra, estes elementos estão na maioria na lamela média e por isso são mais fáceis de ser removidos. Desta forma, passam a ser a maior parte dos extrativos (AGGARWAL; SINGH, 1990).

Para se entender o que pode ter afetado a hidratação do cimento, é importante que se observem as mudanças químicas da madeira após imersão. Para *Populus hybrid*, a imersão em solução alcalina não afetou a lignina Klason ou a solúvel em ácido. O efeito do meio alcalino aumenta os carboidratos, exceto pela quantidade de celobiose que é constante. Por ser uma folhosa, não apresentou quantidade significativa de arabinose e galactose. A média de xilose diminuiu em quase 2% após imersão em solução calcária. Este açúcar, sendo o representante da glicuronoxilana na espécie, indica que a hemicelulose foi hidrolisada em condições alcalinas. E isso também pode ser confirmado pela

diminuição de manose e glicose, representante dos glucomananos. Por outro lado, o índice de cristalino da celulose aumentou neste tipo de tratamento (SIMATUPANG; SCHMITT, 1992).

Resultado semelhante foi encontrado ao se estudar cinco diferentes espécies de madeira lituana. Pesquisadores observaram que a madeira em forma de pó se diluiu de 5 a 10 vezes mais em solução alcalina do que em água. A explicação para esse fenômeno foi que, sob a influência de hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), a hemicelulose sofreu degradação e tornou-se um açúcar solúvel (VAICKELIONIS; VAICKELIONIENE, 2003).

O pré-tratamento da madeira com cal pode ser de duas formas:

a) Partículas podem ser tratadas com hidróxido de cálcio antes do processo de secagem da madeira. Durante este período, o $Ca(OH)_2$ reage naturalmente com o CO_2 presente na atmosfera e forma o carbonato de cálcio ($CaCO_2$). Este processo é chamado de carbonatação da madeira.
b) A cal é acrescentada diretamente na mistura madeira-cimento.

As duas formas de aplicação minimizam o efeito inibidor da madeira, sendo que a aplicação direta do hidróxido de cálcio pode ainda ter um efeito positivo nas propriedades físico-mecânicas dos compósitos após a cura (AZAMBUJA et al., 2017).

4.2 Aceleradores

4.2.1 Aditivos químicos

O uso de aditivos químicos na produção de compósitos madeira-cimento apresenta um princípio diferente dos procedimentos de extração de substâncias inibidoras presentes na madeira. Aditivos químicos agem como aceleradores da cura do cimento. O uso de aditivos químicos para este fim varia tanto em formulação quanto em concentração.

Aditivos químicos podem ser classificados em dois tipos de acordo com o padrão da curva exotérmica das 24 horas iniciais da pega do cimento. Os aditivos do tipo I são aqueles em que a curva de hidratação apresenta dois picos, semelhantes à curva de hidratação do cimento puro. Já os aditivos do tipo II são aqueles que apresentam apenas um pico exotérmico, a reação atinge uma temperatura máxima rapidamente, mas passa a diminuir durante o resto do período. Porém, a classificação do tipo de aditivo é dependente da espécie usada na mistura. Ou seja, cada fórmula de aditivo pode ser considerada tipo I para um tipo de madeira, mas apresentar comportamento de tipo II para outra espécie (WEI; ZHOU; TOMITA, 2000b).

Semple e Evans (2002) estudaram o efeito de 137 substâncias como aditivo químico para a diminuição do efeito de inibição que a madeira da *Acacia mangium* causa na pega do cimento. Entre as substâncias, havia cloretos, sulfatos, nitratos, acetatos, óxidos, carbonatos e fluoreto dos cátions Al, Ba, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Sr e Zn. Os autores encontraram diversas substâncias mais eficientes do que o $CaCl_2$, que é o aditivo mais conhecido e usado como acelerador da cura do cimento, como por exemplo $SnCl_4$, $AlCl_3$, $(NH_4)_2Ce(NO_3)_6$ e $FeCl_3$. Estas substâncias possuem cátions que formam quelatos insolúveis ao reagirem com o extrato alcalino da madeira, diminuindo seu efeito inibidor.

Pereira et al. (2012) compararam as propriedades de painéis madeira-cimento produzidos com duas espécies (*Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus*) com e sem adição de 2% de cloreto de cálcio. Para as duas espécies, o uso do cloreto mostrou-se benéfico tanto para as propriedades físicas quanto mecânicas.

Badejo et al. (2011) testaram o uso de cloreto de alumínio na produção de painéis com serragem de 8 espécies tropicais da Nigéria e cimento. Foi observada uma relação direta ente a melhora das propriedades físicas e mecânicas dos compósitos e o aumento da quantidade de cloreto usado de 1 a 3% da massa do cimento.

Matoski et al. (2013) estudaram a influência do uso de dois tipos de cloreto ($CaCl_2$ e $MgCl_2$) e de dois outros tipos de aceleradores (Na_2SiO_3 e Al_2SO_4) nas propriedades de compósitos madeira-cimento produzidos com pó de *Pinus* sp e cimento Portland tipo V ARI. A adição de cloreto, independente do tipo, resultou em compósitos com melhores propriedades físicas e mecânicas. Entre os demais aceleradores, o Al_2SO_4 foi melhor do que o Na_2SiO_3.

A eficiência de diferentes tipos de cloretos está em sua reação inicial com o C_3A presente no cimento formando hidrocloroaluminato de cálcio ($3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$), que é mais solúvel em água do que o C-S-H, resultando em um primeiro pico exotérmico. Alguns cloretos, como o $CaCl_2$, ainda aumentam a presença de alcalinos dissolvidos no cimento. Assim, há uma precipitação de sulfoaluminato de cálcio, acompanhado de cloro-aluminato resultando em um aumento de temperatura observado no segundo pico (WEI; ZHOU; TOMITA, 2000b). Porém, os benefícios do cloreto nas propriedades mecânicas dos painéis são relativos e dependem do tipo e estado da madeira. Compósitos madeira-cimento com partículas de *Pinus resinosa* tratada com CCA que utilizaram de 3% $CaCl_2$ tiveram uma redução do índice de inibição de 30,70 para 8,74. Contudo, essa melhoria não foi refletida para as propriedades mecânicas do compósito após período de cura. A adição de 5% de $CaCl_2$ resultou em compósitos com valores de ligação interna e MOR menores (HUANG, 1999).

Embora o cloreto seja considerado um acelerador eficiente, seu uso em excesso vem sendo questionado uma vez que esta substância causa corrosão de metais, o que pode acabar limitando sua aplicação final. Assim, pesquisadores cada vez mais buscam o limite máximo de cloreto que poderia ser adicionado na mistura sem comprometer o uso. Este fenômeno ainda não é completamente compreendido e não há uma norma universal sobre a quantidade aceitável. Países europeus e norte-americanos limitam o uso em apenas 0,4% de cloreto com base no peso do cimento (ANGST et al., 2009).

4.2.2 Aditivos minerais

Aditivos minerais, como microssílica, metacaulim ou cinzas, foram testados em compósitos madeira-cimento de diferentes espécies em substituição de parte do cimento Portland como uma técnica para aumentar a resistência dos painéis em contraposição ao possível efeito pernicioso da madeira.

Após a hidratação do C_3S e C_2S presentes no cimento, há formação de Ca $(OH)_2$ livre. Quando materiais podizólicos são adicionados à mistura, a sílica ativa reage com o hidróxido de cálcio, formando uma quantidade extra do gel C-S-H, responsável pela resistência do cimento (BIRICIK et al., 1999). Além disso, o SiO_2 pode criar uma camada entre as partículas assim como penetrar parcialmente nos poros da madeira, com isso o contato direto entre o cimento e material inibidor presente na madeira é reduzido (SIMATUPANG; LANG; NEUBAUER, 1987).

Del Menezzi, Castro e Souza (2007) utilizaram 10 e 20% de microssílica na produção de um painel de *Pinus taeda* e cimento Portland tipo II com partículas orientadas. A adição de 10% do material podizólico mostrou-se eficiente na melhoria das propriedades mecânicas do compósito, sendo que o uso de microssílica em proporções abaixo de 25% exige a aplicação simultânea de outros aditivos, como por exemplo o $CaCl_2$ (SIMATUPANG; LANG; NEUBAUER, 1987).

Contudo, Silva et al. (2006) não observaram um aumento significativo das propriedades mecânicas de painéis de *Eucalyptus urophylla* e cimento Portland tipo ARI ao adicionar 20 e 30% de metacaulim ou de microssílica. Porém, as propriedades físicas, inchamento de espessura após 24 horas e absorção de água após 2 horas, foram melhoradas, principalmente com a adição de 20% de microssílica. A redução das propriedades mecânicas em compósitos com alta concentração de metacaulim pode estar relacionada com o efeito do aditivo mineral de redução de pH e na quantidade livre de Ca $(OH)_2$ na reação (SIMATUPANG, 1998).

Além disso, o uso de metacaulim parece não estar relacionado diretamente com a inibição da madeira quanto à cura do cimento. A substituição gradativa de 10% do peso de cimento por metacaulim (variando de 0 à 50%) levou a uma diminuição da temperatura de hidratação da mistura de *Larix* sp., *Populus* sp. e cimento portland PZ 45F de 76,5oC para 39oC. O tempo para se atingir a temperatura máxima também foi alterado, sendo que misturas com 50% de aditivo mineral levou o dobro do tempo de hidratação do que sem o aditivo (SIMATUPANG, 1998).

Outra possibilidade é a substituição parcial do cimento Portland por cinza volante e escória de alto-forno na confecção de compósitos. O uso de 5% de cinza resulta em compósitos com melhores propriedades mecânicas mesmo sem a adição do acelerador $CaCl_2$. Já para o uso de escória de alto-forno o teor ótimo de substituição é de 25% (LIMA; IWAKIRI, 2012).

4.2.3 Injeção de CO2

Dióxido de carbono é neutralizado pelo carbonato de sílica presente no cimento e resulta na formação do carbonato de cálcio ($CaCO_3$), que é altamente insolúvel. O $CaCO_3$ formado passa a ter a capacidade de se liga com o CSH e a superfície da madeira (HERMAWAN et al., 2002). A maior vantagem do método de injeção de CO_2 é o tempo de cura do compósito. Geralmente o cimento Portland necessita de 28 dias para que sua resistência mecânica máxima seja obtida, porém, neste método, o compósito é totalmente curado em até 2 semanas em temperatura ambiente. No caso específico de madeira-cimento, partículas consideradas incompatíveis com o cimento passam a poder ser usadas sem demonstrar o efeito inibidor.

Entre as variáveis que envolvem o sucesso deste método, pode-se citar (SIMATUPANG et al., 1995):

Influência da pressão de injeção do CO2: O aumento da pressão do gás aumenta a temperatura máxima de hidratação e diminuí o tempo de pega. A concentração de carbonato de cálcio também irá ser maior.

Influência da relação água/cimento: A quantidade de água adicionada na mistura irá influenciar a temperatura e o tempo de hidratação, além do teor de carbonato de cálcio. Deve haver água suficiente para a reação, mas se a quantidade for excessiva, a permeabilidade do gás passa a ser baixa e não há penetração e carbonatação suficiente.

5 | FATORES DE PRODUÇÃO QUE INFLUENCIAM A QUALIDADE

5.1 Relação Madeira/Cimento

Comercialmente a relação da quantidade de cimento-madeira dos painéis comerciais produzidos pelo método *BISON* incorporam 2,75 a 3,0 partes de cimento para 1 parte de madeira, com base no peso seco da madeira. Este método envolve o uso de prensas hidráulicas de pratos durante a fase de pega de compósitos em forma de painéis formados pela mistura cimento, partículas de madeira e 10% de água, o que resulta em painéis com massa específica em torno de 1.250 kg m-3. O método *BISON* ainda é o mais utilizado na produção de compósitos madeira-cimento. Foi em 1973 que a empresa suíça *Durisol* desenvolveu o processo de produção de painéis madeira-cimento de alta massa específica. Um ano depois, a empresa decidiu oferecer licenças internacionais para produção deste tipo de painel com um acordo com a empresa alemã *Bisonwerke* que manufaturava e vendia plantas de fábricas. E desde então o processo vem sendo estudado e replicado como o padrão para fabricações deste material.

Contudo, o custo de produção dos compósitos é diretamente correlacionado com a relação madeira/cimento usada na mistura. Embora o preço de mercado do cimento seja inferior ao da madeira, ao utilizarmos tais relações, o cimento torna-se a parte mais cara do processo, por ser utilizado em maior quantidade (SIMATUPANG, 1989). Além disso, a grande quantidade de cimento também é responsável por compósitos mais pesados, que resultam no aumento do custo de transporte e manuseio (MOSLEMI; PFISTER, 1987).

Por outro lado, quanto maior a quantidade de cimento envolvida no processo, melhor será a resistência mecânica do compósito. Existe uma correlação linear entre a razão cimento/madeira e a resistência à flexão (SIMATUPANG, 1979). A relação ideal depende de algumas outras variáveis, como, por exemplo, o tipo de partícula utilizada. Quando partículas tipo *Excelsior* (tiras de madeiras com comprimento médio de 500 mm, espessura entre 0,15 e 0,38 mm e largura média variando entre 0,50 a 0,42 mm) são utilizadas, o ótimo de propriedades estruturais do compósito é atingido ao utilizar uma relação de 2 partes de cimento para 1 de madeira. Se uma relação menor for usada, a madeira não é recoberta suficientemente pelo cimento e resulta em uma baixa ligação interna. Por outro lado, se a relação for maior, aumentando a quantidade de cimento, a taxa de compactação será reduzida resultando em uma baixa flexão estática (LEE, 1985).

Para partículas tipo *Strand* (40 x 5 x 0,5 mm), tradicionalmente usadas para produção de painéis tipo OSB, as propriedades mecânicas de módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) tendem a melhorar com o aumento da quantidade de madeira de 30% para 40%. Porém, se for misturado 60% de madeira, os valores médios destas propriedades diminuem. Já a ligação interna teve seu valor máximo com a mistura de 30% de madeira. Quanto maior a quantidade de madeira, maior foi as ligações madeira-madeira, e consequentemente, menor a área de conectividade entre madeira e cimento. Já a propriedade de resistência ao impacto apresentou uma correlação direta com o aumento de madeira na mistura (ASHORI; TABARSA; SEPAHVAND,

2012). Porém, tradicionalmente, a partícula utilizada na produção de compósitos é a tipo *Flake* (partículas com comprimento médio entre 2 e 20 mm, espessura com menos de 1 mm e largura média entre 0,2 e 2,5 mm). Marzuki et al. (2011) analisaram o efeito de quatro diferentes proporções de cimento e madeira de *Leucaena leucocephala* (1,75:1; 2:1; 2,25:1; e 2,5:1) nas propriedades físicas e mecânicas de painéis aglomerados de multicamada com densidade nominal de 1,3 g/cm3. Foi concluído que, quanto maior a quantidade de cimento, menores foram os valores de inchamento em espessura e maiores foram os valores de absorção de água. Os melhores resultados de MOR foram encontrados para a relação madeira/cimento de 1,75:1. Todavia, o MOE apresentou comportamento oposto, sendo seus melhores resultados obtidos na relação 2,5:1. Já a ligação interna apresentou seu ótimo na relação 2:1.

Comportamento semelhante também foi observado em pesquisa com compósitos produzidos com *Picea abies* (OYAGADE, 1990). Quando a densidade do compósito foi mantida constante, a quantidade de cimento tendeu a melhorar as propriedades de flexão, mas o efeito foi mais forte no MOR e na carga máxima do que na propriedade de MOE. Ou seja, antes de se tomar a decisão por qual quantidade de cimento será aplicado em um compósito, é importante conhecer seu uso final, para que seja sabido qual a propriedades será mais requisitada.

O efeito da quantidade de cimento também é influenciado pelo tipo de cimento utilizado na mistura. O efeito da relação madeira/cimento de 1:1,5 para 1:3 não foi observado na propriedade MOR quando o cimento Portland tipo I foi utilizado. Por outro lado, para o cimento Portland tipo III, a relação ideal foi 1:2 (MOSLEMI; PFISTER, 1987). Já a espécie de madeira utilizada passa a ter pouca influência na propriedade resistência à compressão, por exemplo, quando a relação madeira/cimento é avaliada. Isso ocorre quando a propriedade é função da densidade do compósito e esta é linearmente proporcional à quantidade de cimento utilizado (LEE et al., 1987).

5.2 Quantidade de água

Conhecer a exata quantidade de água adicionada na mistura é extremamente importante quando se prepara um compósito madeira-cimento. Ao mesmo tempo em que é necessário oferecer água o suficiente para que a reação de pega do cimento ocorra, também deve ser levada em consideração a capacidade higroscópica da madeira. Em um dos estudos pioneiros sobre o tema, Simatupang (1979) considerou o efeito da quantidade de água (variando entre 25 e 75% do peso seco do cimento usado) em compósitos de madeira de *Picea* sp. O autor concluiu que a quantidade de água ideal para o compósito depende da relação entre madeira-cimento. Em uma relação cimento/madeira de 3,5, o valor máximo para resistência à flexão foi de 35% de água. Se essa relação baixar para 3, 2,5 ou 2, a resistência é maior para a proporção de 45% de água. Já uma relação cimento/madeira de 1,5 necessita de mais água e atinge melhores resultados com 55%.

Uma vez que a variação da quantidade de água é razão da capacidade de absorção da madeira, a relação água/cimento também depende da geometria das partículas de madeira. Partículas menores e mais finas possuem uma maior área superficial e, por conseqüência, uma maior superfície de absorção de água. É importante ressaltar que índices mais elevados de água são menos prejudiciais à mistura do que uma baixa relação. Assim, na fabricação de compósitos madeira-cimento, pode-se acrescentar uma quantidade extra de água sem risco (SIMATUPANG, 1979).

Outra questão prática para indústrias deste tipo de compósito é o fato de que as partículas de madeira não precisam ser secas antes de serem usadas nas misturas com o cimento. No processo de prensagem, a água presente na madeira sai dos poros e reage com o cimento. Por isso, é necessário considerar o ponto de saturação das fibras médio da madeira (30%) no cálculo da quantidade ideal de água na mistura.

$$H_2O = (C \times 0,35) + (M \times (0,3 - TU\%))$$

Legenda: Em que: H2O, quantidade de água a ser acrescentada na mistura (mL); C, o peso do cimento (g); M, o peso das partículas (g); e TU% o teor de umidade das partículas (%).
Fonte: Simatupang (1979).

Por se tratar de uma fórmula geral, foi considerada a relação de água-cimento efetiva (35%) ao invés da relação água-cimento total, uma vez que essa relação depende da razão madeira-cimento. Na relação total, a quantidade de água considera toda a água livre e a absorvida pelos agregados, enquanto a relação efetiva leva em consideração apenas a água que reage com o cimento. Assim, concretos mais porosos exigem uma quantidade de água total maior do que concretos densos, embora ambos utilizem basicamente a mesma quantidade de água efetiva. Por exemplo, tanto compósitos que usaram uma razão cimento/madeira de 1,5, quanto de 3, apresentaram uma mesma razão de água efetiva de 35%, diferente das proporções de água total, 55 e 45% respectivamente (SIMATUPANG, 1979).

Ao considerar que a capacidade de absorção de cada espécie e de partículas de diferente tamanho será diferente, uma nova adaptação da fórmula foi sugerida (KARADE, 2005):

$$W_w = 0,35W_c + \frac{A_w W_g}{100}$$

Legenda: Em que: Ww, quantidade de água a ser acrescentada na mistura (mL); Wc e Wg, o peso do cimento (g) e peso seco das partículas de madeira(g); e Aw, a capacidade de absorção da partícula em porcentagem pelo peso (%).

5.3 Geometria das partículas de madeira

Vários fatores contribuem para as propriedades dos compósitos madeira-cimento e, entre estes, a geometria das partículas é uma das variáveis mais importantes, pois afeta a liberação de extrativos, a quantidade de água necessária e até mesmo a ligação mecânica entre as matérias-primas. A geometria da partícula envolve não só o formato, mas também as dimensões. Por exemplo, o tamanho da partícula contribui com o grau de ligação entre as partículas de madeira e o cimento, e consequentemente a resistência à flexão do compósito (OLORUNNISOLA, 2009). Em compósitos madeira-cimento produzidos com partículas de madeira de espécies tropicais mais longas, foi observada melhor estabilidade dimensional em relação à absorção de água, inchamento de espessura e maiores valores de MOR e MOE (BADEJO, 1988).

Trabalhos mais antigos indicam que o tamanho e geometria da partícula teria efeito semelhante tanto em madeira-cimento quanto em painéis tradicionais de resina, porém trabalhos recentes sugerem uma importante diferença. Frybort et al. (2008), em sua revisão de literatura sobre o estado da arte na produção de compósitos madeira-cimento, relataram trabalhos que apontam a necessidade de partículas maiores do que as usadas em painéis tradicionais, isso porque existem custos da redução das dimensões do material que interferem na viabilidade no produto, tanto na mecanização necessária para fragmentar as partículas, quanto pela quantidade maior de material aglutinante que incorpora o painel com maiores superfícies de contato de seus componentes.

Para compósitos de madeira de *Alnus subcordata* e *Populus deltoides*, com uma relação madeira-cimento de 1:3, foi encontrada uma forte correlação negativa entre o tamanho da partícula e os resultados de MOR e ligação interna. Também foi encontrado uma correlação positiva entre tamanho da partícula, absorção de água e inchamento de espessura (NAZERIAN; GHALEHNO; GOZALI, 2011).

O tamanho ideal da partícula depende também do método de densificação utilizado na produção do compósito. Tradicionalmente os compósitos são produzidos sob pressão em prensas hidráulicas, mas um novo método alternativo de vibro compactação vem sendo estudado. Neste método, o compósito não é adensado por pressão, e sim por vibração. Assim, o tamanho da partícula pode passar a ser um fator limitante, pois partículas grandes têm dificuldade de vibrar e assentar, gerando compósitos menos densificados. Por outro lado, partículas pequenas possuem maior área superficial e necessitam de maior quantidade de cimento para o revestimento total (AZAMBUJA et al., 2017).

Painéis do tipo OSB, que utilizam partículas do tipo *Strands* (75 mm de comprimento, 20 mm de largura e 0,75 mm de espessura) maiores do que a tipo *Flake* tradicionalmente utilizadas para aglomerados, são mais complicados de se produzir quando o cimento é o aglomerante. Isso porque não há um entrelaçamento das partículas, o que tende a enfraquecer a ligação interna do compósito. Porém, embora difícil, não é impossível a produção deste compósito, sendo que alguns autores inclusive chamam a atenção para este tipo de partícula, a relação cimento/madeira pode até ser menor do que a tradicionalmente usada no processo BISON (PAPABOPOULOS; NTALOS; KAKARAS, 2006; DEL MENEZZI; CASTRO; SOUZA, 2007).

5.4 Presença de casca

A utilização de casca de essências florestais geralmente não é aconselhável devido aos altos teores de matéria orgânica que influenciam a hidratação do cimento. Por exemplo, o índice de inibição da madeira de *Eucalyptus grandis* é em torno de 11,75, valor que a classifica como material de inibição moderada. Já para casca desta espécie, o índice de inibição é de 168,26, considerado um material de inibição extremamente alta. A justificativa para esse comportamento pode ser a quantidade de extrativos totais, que varia de 4 para 20% quando se compara a madeira com a casca. Porém, se as cascas forem tratadas

com extrações em água fria e NaOH, o seu índice de inibição pode ser baixado para 8,3 que é considerado um índice extremamente baixo (MORI et al., 2007). A produção de compósitos madeira-cimento com incorporação de 25% de casca tratada de *Eucalyptus grandis* apresentou valores de compressão paralela maiores dos que os apresentados por painéis produzidos sem adição de casca. A ligação interna, o MOE, absorção de água e inchamento em espessura também não foram alteradas com a adição de 25% de casca tratada, mas a adição de casca sem tratamento prévio mostrou-se inviável para a produção de painéis madeira-cimento (LOPES et al., 2005).

Silva et al. (2006) analisaram o efeito da presença de casca nas propriedades físicas e mecânicas de compósitos de madeira de *Eucalyptus urophilla* e cimento Portland ARI. O uso de 5 ou 10% de casca em relação ao peso da madeira afetou negativamente tanto as propriedades mecânicas (MOR, MOE e ligação interna) quanto as propriedades físicas (inchamento em espessura e absorção de água). As propriedades de MOE e inchamento em espessura apresentaram diferenças significativas para painéis com 5 ou 10%. Porém, o efeito negativo nas propriedades foi contornado com a adição de 20% de microssílica na composição dos painéis.

A mesma espécie foi estudada em outro experimento e apresentou resultados diferentes, mas com comportamentos semelhantes. A adição de 10% de casca de *Eucalyptus urophilla* na composição dos compósitos não foi o suficiente para alterar as propriedades de ligação interna, MOE e inchamento em espessura após 2 horas. O acréscimo de 20% de casca não alterou o resultado a absorção de água após 2 horas. Nem mesmo a adição de 25% de casca em relação ao peso da madeira foi o suficiente para alterar os valores de MOR (SILVA et al., 2005b).

5.5 Fatores de prensagem

A temperatura ideal para prensa varia entre 40 e 80oC e é influenciada pela composição química da madeira, o tipo do cimento e o uso de

aditivos. Após a prensagem, o painel deve ser mantido por volta de 6 a 8 horas grampeados (SIMATUPANG et al., 1991). O tempo de grampo reduz a produtividade em uma empresa de painéis madeira-cimento. Entre os métodos estudados para se diminuir esse tempo, há a exposição dos painéis ao CO_2 na fase inicial do processo. O dióxido de carbono abaixa o pH da mistura através da formação de ácido carbônico, que é neutralizado pelo silicato de cálcio presente no cimento que resulta em $CaCO_3$ mais insolúveis. Os carbonatos são os responsáveis pela ligação interna inicial que permite a liberação da prensa em questões de minutos. Contudo, a concentração do gás deve ser controlada. Uma quantidade excessiva pode provocar um endurecimento muito rápido da superfície que impediria a penetração do gás no interior do painel. O aquecimento excessivo da mistura devido à aceleração exotérmica também pode gerar uma instabilidade dimensional e, assim, ocasionar micro rachaduras (SOROUSHIAN et al., 2003).

Ashori et al. (2012) testaram o uso de madeira reaproveitada de dormentes de estrada de ferro para a produção de compósitos madeira-cimento. Usando uma pressão de 40 kg/cm2 por 5 minutos, eles variaram apenas a temperatura entre 25 e 60oC. Foi observado que as propriedades mecânicas diminuíram com o aumento da temperatura, enquanto a absorção de água e o inchamento de espessura aumentaram. Porém, neste caso, como havia a possibilidade de os dormentes serem tratados com creosoto, uma possibilidade para os valores ruins em compósitos tratados em alta temperatura foi a difusão do produto químico para a superfície reduzindo assim a interação entre madeira e cimento.

Um método alternativo, chamado de vibro compactação ou vibro densificação, vem sendo proposto para se produzir compósitos madeira-cimento sem o uso de prensa hidráulica de pratos (OMONIYI; AKINYEMI; OLAYIWOLA, 2013; PARCHEN et al., 2016). Este método usa uma mesa vibratória, tradicionalmente utilizada na produção de blocos de concreto, para adensar os compósitos sem a aplicação de pressão. A maior vantagem deste processo é que uma mesa vibratória

é mais simples e barata do que uma prensa hidráulica e pode, ainda, ser facilmente montada pelo próprio operador no local de utilização do produto. Com a vibração, há a eliminação do ar presente na mistura, o que força uma acomodação das partículas. O problema mais comum que pode ocorrer nos casos de vibração é a compactação não uniforme. Isso pode ser resultado de uma vibração inadequada ou excessiva, que causa segregação na mistura (NEVILLE; BROOKS, 2010).

Outra vantagem do método é que os compósitos podem ser produzidos de diversos formatos definidos pelo molde submetido à vibração. Todavia, é importante levar em consideração que a forma do molde pode afetar o resultado final do produto, uma vez que o espaçamento para a movimentação e consolidação das partículas é afetado. Castro, Parchen e Iwakiri (2018) observaram que o tamanho do molde pode ser uma variável para se controlar a densificação de um painel vibro-compactado. Quanto menor o espaço físico para movimentação da madeira, maior será a densidade final do painel. E, uma vez ajustada a densidade, painéis vibro-compactados podem apresentar propriedades físico-mecânicas semelhantes aos painéis tradicionalmente prensados.

5.6 Umidade de equilíbrio

A relação entre a umidade de equilíbrio e a umidade relativa (UR) e temperatura (oC) é denominada isoterma de sorção e afeta a resistência mecânica e a estabilidade dimensional de produtos compostos de madeira. Silva et al. (2005a) determinaram a umidade de equilíbrio de diversos tipos de painéis de madeira, inclusive de dois tipos de painéis de madeira-cimento sem revestimento. Os valores médios encontrados na temperatura de 30oC e umidade relativa de 40, 50, 60, 70, 80 e 90% encontraram-se entre 9,54 e 11,14. Também foi calculada a histerese através da razão entre as umidades de equilíbrio de absorção e dessorção e os valores médios encontrados foram de 0,89 e 0,95. Essa diferença foi atribuída à possível variação da granulometria dos painéis.

Também foi comprovado que o teor de umidade afeta a performance de compósitos madeira-cimento produzidos com adição de CO_2 no processo de cura. Um teor de 30% apresentou melhores valores de ligação interna, MOR e MOE em painéis madeira-cimento produzidos com *Chamaecyparis obtusa* e *Crypyomeria japonica*. Teores de umidades mais baixos apresentaram resultados piores do que os painéis de controle porque a reação de carbonatação não é bem sucedida por causa da quantidade de água insuficiente (MAAIL et al., 2012).

5.7 Tempo de cura

Compósitos madeira-cimento irão atingir sua resistência máxima no tempo necessário para ocorrer a cura do cimento utilizado na mistura, sendo que, para os cimentos Portland, são geralmente necessários 28 dias (com exceção do CP V -ARI, que atinge sua cura em 7 dias). Este período de cura pode ser uma desvantagem em um processo de produção do ponto de vista logístico e de custo de armazenamento. E, uma vez que as partículas de madeira podem vir a retardar a cura do cimento, este período pode ser ainda mais longo.

O efeito da cura do compósito madeira-cimento é variável entre as propriedades mecânicas requisitadas. Por exemplo, o módulo de elasticidade do compósito realmente depende do período de 28 dia, porém o módulo de ruptura e a estabilidade dimensional já apresentaram valores máximos dentro dos primeiros 14 dias (MOSLEMI; PFISTER, 1987).

Blankenhorn et al. (1994) analisaram o efeito de 7, 14, 28 e 56 dias de cura na resistência à compressão de cinco tipos diferentes de corpos de prova de madeira-cimento produzidos com *Quercus rubra*, *Acer sacharum*, *Populus tremuloides*, *Acer rubrum* e *Pinus taeda*. A resistência à compressão aumentou de acordo com o maior tempo de cura para todos os casos. Porém, aos 28 dias, os corpos de prova com *Pinus taeda*, já haviam atingido cerca de 96% da sua resistência

final, enquanto os de *Quercus rubra* apenas aproximadamente 53% do seu potencial. Assim, o tempo de cura depende também da espécie utilizada no compósito.

Savastano Jr. et al. (2000) estudaram compósitos de cimento reforçado com diversos tipos de fibras, entre elas a de *Pinus radiata* e a de sisal (*Agave sisalana*). Os autores não encontraram diferença significativa para compósitos testados com 28 e 42 dias para as propriedades de MOR, MOE e resistência à fratura.

Da mesma forma que há técnicas para reduzir o tempo de pega do cimento, também pode se encurtar o tempo de cura dos compósitos sem afetar suas propriedades finais. Por exemplo, Latorraca e Iwakiri (2001) testaram a cura de painéis de madeira de *Eucalyptus urophylla* e cimento em câmera vaporizada. Painéis que foram submetidos à cura a vapor apresentaram valores de MOE e compressão paralela, respectivamente, após 7 e 14 dias equivalentes aos painéis curados em câmera climática após 28 dias. Porém, o método não apresentou resultado para a redução de tempo necessária para alcançar valores máximos de MOR e ligação interna.

O período de cura de 28 dias também pode ser acelerado para poucos minutos pela utilização de dióxido de carbono, CO_2, durante o processo de prensagem dos painéis madeira-cimento. O gás acelera a formação de C-S-H e $CaCO_3$. As propriedades mecânicas dos painéis aumenta de acordo com o aumento da concentração de CO_2, porém, a injeção de apenas 10% do gás a uma pressão de 7,5MPa é o suficiente para que painéis com 10 minutos de cura apresentem resultados semelhantes a painéis madeira-cimento tradicionais após 14 dias de cura (HERMAWAN et al., 2002).

6 PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS

6.1 Módulo de Elasticidade

Elasticidade é quando a deformação produzida por um estresse abaixo do limite proporcional é totalmente recuperada após a remoção da carga. Quando a carga gera um estresse maior do que o limite proporcional, ocorre deformação plástica ou rompimento. Geralmente a curva de carga por deformação é linear abaixo do limite proporcional. A inclinação da curva linear é o módulo de elasticidade (MOE). Para testes de compressão e tração, esta inclinação pode ser chamada de módulo de Young para ser diferenciada do MOE do teste de flexão. O MOE de flexão é a medida da resistência à flexão, que é relacionada a rigidez.

Para compósitos madeira-cimento, existe uma correlação linear entre valores de MOE e a relação madeira/cimento aplicada na mistura (MOSLEMI; PFISTER, 1987). Na tabela 3, são apresentados alguns valores encontrados na literatura para compósitos de diferentes espécies, relações madeira/cimento e massa específica, produzidos pelo método *BISON*.

Tabela 3 - Valores de MOE encontrados na literatura para painéis madeira-cimento de diversas espécies com adição de 3% de CaCl2

ESPÉCIE	M:C	ME (g/cm3)	MOE (MPa)	REFERÊNCIA
PINUS				
P. caribaea	1:2	1,79	7.813	Erakhrumen et al. (2008)
*P. pinaster**	1:3	1,14	4.870	Semple e Evans (2004)
P. radiata *	1:3	1,21	4.990	Semple e Evans (2004)
P. taeda	1:2,75	1,19	4.290	Iwakiri e Prata (2008)
EUCALYPTUS				
E. bicostata	1:3	1,14	2.634	Semple e Evans (2004)
E. dunnii	1:2,75	1,13	980	Iwakiri e Prata (2008)
E. grandis	1:2,75	1,12	4.780	Iwakiri e Prata (2008)
E. saligna	1:2,75	1,06	2.522	Castro et al. (2015)
*E. urophylla***	1:2,75	1,09	1.659	Latorraca e Iwakiri (2001)
OUTRAS ESPÉCIES				
Cecropia hololeuca	1:2,75	1,04	3.232	Iwakiri et al. (2012)
*Cedrela odorata****	1:3	1,33	7.730	Macêdo, Souza e Pompeu Neto (2012)
*Hymenaea courbaril****	1:3	1,56	5.220	Macêdo, Souza e Pompeu Neto (2012)
Leucaena leucocephala	1:2,5	1,27	4.002	Marzuki et al. (2011)
Schizolobium amazonicum	1:2,75	1,13	3.203	Iwakiri et al. (2012)
Terminalia superba	1:2,3	1,20	3.104	Fuwape e Oyagade (1993)
*Toona ciliata***	1:2,75	1,16	4.697	Sá et al. (2010)
Vochysia maxima	1:3	1,43	5.340	Macêdo, Souza e Pompeu Neto (2012)

Legenda: Em que: M:C, relação madeira:cimento; ME, massa específica do compósito; MOE, módulo de elasticidade; * uso de 2% de CaCl2; ** uso de 4% de CaCl2; *** uso de 5% de CaCl2

Atualmente uma das tendências para determinação de propriedades mecânicas, especialmente o MOE são as técnicas não-destrutivas. Bejo, Takats e Vass (2005) determinaram o MOE estático e dinâmico de vigas produzidas com madeira- cimento para quatro diferentes espécies. Para todos os tratamentos, o MOE dinâmico foi aproximadamente duas vezes maior do que o estático. Isso ocorre devido à natureza viscoelástica da madeira. Embora os valores brutos sejam discrepantes, foi determinado uma correlação razoavelmente alta para os diferentes tipos de medição.

A propriedade MOE também é afetada pelo método de produção, comportamento este que também se repete para as demais propriedades mecânicas. Compósitos adensados por vibração apresentam menores valores médios do que os produzidos pelo método *BISON* quando as demais variáveis (espécie, aditivos, relação madeira/cimento) foram mantidas (CASTRO et al., 2015).

6.2 Módulo de Ruptura

O módulo de ruptura (MOR) indica a resistência à flexão de um corpo causado por uma carga. É uma propriedade muito importante para se determinar a aplicabilidade de um compósito para fins estruturais.

Diferente da relação com o MOE, o MOR apresenta uma correlação diferente com a proporção de cimento-madeira. Valores destas propriedades para compósitos produzidos com uma relação de 2 de cimento para 1 de madeira (baseado no peso seco) foram superiores àqueles apresentados por compósitos com proporção 3:1 (MOSLEMI; PFISTER, 1987). Também há uma relação positiva entre a massa específica do compósito e as propriedades mecânicas como um todo e especificamente com o MOR. Uma maior massa específica, alcançada por uma maior pressão durante o processo de produção, resulta na densificação da madeira, eliminação de vãos e melhora a conectividade entre o cimento e a madeira (BEJO; TAKATS; VASS, 2005).

Alguns exemplos de valores médios de MOR apresentados na literatura são relatados na tabela 4 para madeiras de florestas plantadas (*Pinus* e *Eucalyptus*) e de florestas nativas considerando a relação madeira/cimento usada e a massa específica final do compósito investigado.

Tabela 4 - Valores de MOR encontrados na literatura para painéis madeira-cimento de diversas espécies com adição de 3% de CaCl2(continua)

(Continua)

ESPÉCIE	M:C	ME (g/cm3)	MOR (MPa)	REFERÊNCIA
PINUS				
P. caribaea	1:2	1,79	46,90	Erakhrumen et al. (2008)
P. pinaster *	1:3	1,14	13,80	Semple e Evans (2004)
P. radiata *	1:3	1,21	11,90	Semple e Evans (2004)
P. taeda	1:2,75	1,19	9,41	Iwakiri e Prata (2008)
EUCALYPTUS				
E. bicostata	1:3	1,14	7,20	Semple e Evans (2004)
E. dunnii	1:2,75	1,13	3,92	Iwakiri e Prata (2008)
E. grandis	1:2,75	1,12	9,90	Iwakiri e Prata (2008)
E. saligna	1:2,75	1,06	4,02	Castro et al. (2015)
OUTRAS ESPÉCIES				
Alnus subordata	1:3	1,20	11,98	Nazerian et al. (2011)
Cecropia hololeuca	1:2,75	1,04	9,17	Iwakiri et al. (2012)
*Cedrela odorata****	1:3	1,33	9,24	Macêdo, Souza e Pompeu Neto (2012)
*Hymenaea courbaril****	1:3	1,56	4,21	Macêdo, Souza e Pompeu Neto (2012)

Tabela 4 - Valores de MOR encontrados na literatura para painéis madeira-cimento de diversas espécies com adição de 3% de CaCl2(continua)

(Conclusão)

ESPÉCIE	M:C	ME (g/cm3)	MOR (MPa)	REFERÊNCIA
Leucaena leucocephala	1:2,5	1,27	8,95	Marzuki et al. (2011)
Populus deltoides	1:3	1,25	11,45	Nazerian, Ghalehno e Gozali (2011)
Schizolobium amazonicum	1:2,75	1,13	6,80	Iwakiri et al. (2012)
Terminalia superba	1:2,3	1,20	9,00	Fuwape e Oyagade (1993)
*Toona ciliata***	1:2,75	1,16	9,19	Sá et al. (2010)
Vochysia maxima	1:3	1,43	7,66	Macêdo, Souza e Pompeu Neto (2012)

Legenda: Em que: M:C, relação madeira: cimento; ME, massa específica do compósito; MOR, módulo de ruptura; * uso de 2% de CaCl2; ** uso de 4% de CaCl2; *** uso de 5% de CaCl2

Outra variável no processo que afeta diretamente a propriedade MOR é a orientação das partículas. Cabangon et al. (2002) analisaram o efeito da orientação na produção de painéis madeira-cimento com partículas *Excelsior* de *Pinus radiata* e *Populus deltoides* na proporção cimento:madeira de 1:0,8. Para painéis com partículas orientadas, foi apresentado aproximadamente o dobro de valores de MOR do que painéis aleatórios para testes realizados paralelos à orientação. Comportamento similar também foi observado por Del Menezzi, Castro e Souza (2007) ao usarem partículas tipo *Strand* de *Pinus taeda* na relação de 1:1 em relação ao cimento.

6.3 Ligação Interna

Ligação interna ou resistência à tração perpendicular à superfície é resistência máxima suportada por um corpo de prova em um teste em que forças perpendiculares à sua superfície são aplicadas. Sotannde et al. (2012) indicaram que o tipo de partícula e a relação madeira:cimento influenciaram significativamente os resultados médios de ligação interna de compósitos madeira-cimento produzidos com partículas de *Afzelia africana*. Os autores obtiveram maiores médias em compósitos quando partículas de madeira foram misturadas com a madeira em pó do que compósitos produzidos exclusivamente de partículas ou em pó. A mistura de diferentes granulometrias leva a um compósito com menos espaços vazios e, consequentemente, melhor ligação. A propriedade também melhorou com o aumento da quantidade de cimento em relação à madeira.

A ligação interna é uma propriedade importante quando os compósitos são utilizados na forma de painéis, por isso é importante ressaltar também algumas variáveis que a literatura afirma não afetar esta propriedade para oferecer à indústria deste tipo de produto alternativas de matéria-prima. Por exemplo, Santos et al. (2008) estudaram a produção de painéis madeira-cimento produzidos com a mistura de 3 espécies (*Eremanthus erythropappus*, *Eucalyptus* spp e *Pinus* spp) em diferentes proporções. Nenhuma combinação de material estudada afetou a propriedade de ligação interna. Também não foi encontrado efeito significativo para painéis produzidos com madeira de *Toona ciliata* de diferentes idades e procedências (BEJO; TAKATS; VASS, 2005).

Na tabela 5, pode ser observado um conjunto de valores médios para a propriedade de ligação interna encontrada na literatura para compósitos madeira-cimento produzidos com partículas de diversas espécies e adição de 3% de CaCl2,

Tabela 5 - Valores de ligação interna encontrados na literatura para painéis madeira-cimento de diversas espécies com adição de 3% de $CaCl_2$

ESPÉCIE	M:C	ME (g/cm3)	LI (MPa)	REFERÊNCIA
PINUS				
P. taeda	1:2,75	1,19	0,46	Iwakiri e Prata (2008)
EUCALYPTUS				
E. dunnii	1:2,75	1,13	0,26	Iwakiri e Prata (2008)
E. grandis	1:2,75	1,12	0,47	Iwakiri e Prata (2008)
OUTRAS ESPÉCIES				
Alnus subordata	1:3	1,20	0,39	Nazerian, Ghalehno e Gozali (2011)
*Cedrela odorata***	1:3	1,33	1,60	Macêdo, Souza e Pompeu Neto (2012)
Cecropia hololeuca	1:2,75	1,04	0,80	Iwakiri et al. (2012)
*Hymenaea courbaril***	1:3	1,56	1,53	Macêdo, Souza e Pompeu Neto (2012)
Leucaena leucocephala	1:2,5	1,27	0,59	Marzuki et al. (2011)
Populus deltoides	1:3	1,25	0,30	Nazerian, Ghalehno e Gozali (2011)
Schizolobium amazonicum	1:2,75	1,131	0,67	Iwakiri et al. (2012)
*Toona ciliata**	1:2,75	1,16	0,99	Sá et al. (2010)
Vochysia maxima	1:3	1,43	1,35	Macêdo, Souza e Pompeu Neto (2012)

Legenda: Em que: M:C, relação madeira:cimento; ME, massa específica do compósito; LI, ligação interna; * uso de 2% de $CaCl_2$; ** uso de 4% de $CaCl_2$; *** uso de 5% de $CaCl_2$

6.4 Propriedades Físicas

Em geral, as características que tornam os compósitos madeira-cimento desejáveis são a baixa absorção e água e boa estabilidade dimensional. Porém, quando comparados com produtos totalmente minerais, não são

materiais inertes. A variação dimensional em compósitos madeira-cimento ocorre basicamente por quatro processos. O primeiro é devido à alcalinidade do cimento que pode degradar a madeira da mistura. O segundo processo é a carbonatação, processo de conversão de Ca $(OH)_2$ para o cristal $CaCO_3$, que pode causar um estresse entre as partículas de madeira e a pasta de cimento tanto na fase úmida da mistura quanto na secagem. O terceiro processo é a movimentação da umidade para dentro e para fora das partículas e do cimento. E, por último, o quarto processo é a o resultado dos estresses internos durante o processo de fabricação do painel (FAN et al., 2004).

A quantidade de madeira na mistura também é responsável pelo aumento de valores de absorção de água. Quanto maior a quantidade de madeira, menor a massa específica dos compósitos e, consequentemente, maior a porosidade do material. O aumento de espaços vazios também pode estar relacionado à compactação inadequada do material (ASHORI; TABARSA; SEPAHVAND, 2012).

7 COMPÓSITOS DE ESPÉCIES TROPICAIS

Tradicionalmente a madeira tropical não é aplicada na fabricação de compósitos madeira-cimento por duas razões:

1 - a alta massa específica da madeira que acarreta painéis de maior massa específica e, por sua vez, pode levar a problemas de transporte e manuseio do material. A alta massa específica da madeira também contribui para o desgaste das lâminas dos equipamentos utilizados na etapa de preparação das partículas antes da incorporação do cimento (VILELA; DU PASQUIER, 1968);

2 - a tendência de madeiras tropicais serem ricas em extrativos, que podem inibir a pega do cimento. Extrativos solúveis em solventes neutros variam entre 4 e 10% do peso seco de madeiras de regiões temperadas, mas, em madeiras tropicais, podem chegar até a 20% (PETTERSEN, 1984).

Contudo, algumas pesquisas indicam que a inibição à pega do cimento pela mistura de material proveniente de madeira tropical não deve ser generalizada. Uma breve revisão de literatura indicando as espécies tropicais, sem tratamento prévio, e suas compatibilidades com o cimento, pode ser observada na tabela 6.

Tabela 6 - Graus de compatibilidade entre espécies tropicais e cimento Portland

(continua)

ESPÉCIE	COMPATIBILIDADE	REFERÊNCIA
Afzelia bipindensis	Baixa	Fan et al. (2012)
Afzelia quanzenzis	Média	Alberto, Mougel e Zoulalian (2000)
Albizia adianthifolia	Média	Alberto, Mougel e Zoulalian (2000)
Amblygonocarpus andongesis	Alta	Alberto, Mougel e Zoulalian (2000)
Aspidosperma dugandii	Baixa	Vilela e DuPasquier (1968)
Bombacopsis quinata	Alta	Vilela e DuPasquier (1968)
Brachystegia speciformis	Média	Alberto, Mougel e Zoulalian (2000)
Brosimum alicastrum	Alta	Vieira et al. (2005)
Byrsonima crispa	Alta	Castro et al. (2018)
Calophyllum mariae	Alta	Vilela e DuPasquier (1968)
Cedrela odorata	Média	Macêdo, Souza e Pompeu Neto (2012)
Chlorophora excelsa	Baixa	Fan et al. (2012)
Clarisia racemosa	Baixa	Vilela e DuPasquier (1968)

Tabela 6 - Graus de compatibilidade entre espécies tropicais e cimento Portland

(continua)

ESPÉCIE	COMPATIBILI-DADE	REFERÊNCIA
Cinamomum parviflorum	Alta	Vieira et al. (2005)
Colubrina arborescens	Baixa	Vieira et al. (2005)
Cordia collococca	Alta	Vieira et al. (2005)
Couratari oblongifolia	Média	Macêdo, Souza e Pompeu Neto (2012)
Couratia pulchra	Alta	Vilela e DuPasquier (1968)
Daillonella toxisperma	Baixa	Fan et al. (2012)
Distemonanthus benthamianus	Alta	Fan et al. (2012)
Dinizia excelsa	Baixa	Macêdo, Souza e Pompeu Neto (2012)
Entandrophragma cylindricum	Alta	Fan et al. (2012)
Enterolobium cyclocarpum	Baixa	Vilela e DuPasquier (1968)
Eribroma oblongum	Média	Fan et al. (2012)
Erythrophleum ivorense	Média	Fan et al. (2012)
Erythrophleum suaveoleuns	Média	Alberto, Mougel e Zoulalian (2000)
Eschweilera coriacea	Alta	Castro et al. (2018)
Eschweilera monosperma	Média	Vilela e DuPasquier (1968)

Tabela 6 - Graus de compatibilidade entre espécies tropicais e cimento Portland

(continua)

ESPÉCIE	COMPATIBILI-DADE	REFERÊNCIA
Eschweilera odora	Média	Castro et al. (2018)
Genipa americana	Baixa	Vilela e DuPasquier (1968)
Graffenrieda latifolia	Alta	Vilela e DuPasquier (1968)
Hieronyma moritziana	Alta	Vilela e DuPasquier (1968)
Hymenaea courbaril	Baixa	Macêdo, Souza e Pompeu Neto (2012)
Inga alba	Alta	Castro et al. (2018)
Inga paraensis	Alta	Castro et al. (2018)
Jacaranda copia	Baixa	Vilela e DuPasquier (1968)
Juglans insularis	Alta	Vieira et al. (2005)
Julbernadia globiflora	Média	Alberto, Mougel e Zoulalian (2000)
Khaya ivorensis	Média	Fan et al. (2012)
Khaya nyasica	Baixa	Alberto, Mougel e Zoulalian (2000)
Laurocerasus occidentalis	Alta	Vieira et al. (2005)
Manilkara amazonica	Média	Castro et al. (2018)
Mansonia altissima	Baixa	Fan et al. (2012)
Millettia stuhlmannii	Baixa	Alberto, Mougel e Zoulalian (2000)

Tabela 6 - Graus de compatibilidade entre espécies tropicais e cimento Portland

(conclusão)

ESPÉCIE	COMPATIBILIDADE	REFERÊNCIA
Nauclea diderrichii	Baixa	Fan et al. (2012)
Piptadenia rigida	Baixa	Vilela e DuPasquier (1968)
Pouteria guianensis	Alta	Castro et al. (2018)
Protium negletum	Baixa	Vilela e DuPasquier (1968)
Pterocarpus angolensis	Baixa	Alberto, Mougel e Zoulalian (2000)
Pterocarpus soyauxii	Média	Fan et al. (2012)
Sterculia appendiculata	Baixa	Alberto, Mougel e Zoulalian (2000)
Sterculia rhinopetala	Alta	Fan et al. (2012)
Swartzia recurva	Baixa	Castro et al. (2018)
Swietenia mahogoni	Baixa	Vieira et al. (2005)
Symphonia globulifera	Baixa	Macêdo, Souza e Pompeu Neto (2012)
Terminalia superba	Média	Fan et al. (2012)
Triplochiton scleroxylon	Média	Fan et al. (2012)
Vochysia maxima	Média	Macêdo, Souza e Pompeu Neto (2012)
Zuelania guidonia	Alta	Vieira et al. (2005)

REFERÊNCIAS

AGGARWAL, L. K.; SINGH, J. Effect of plant fibre extractives on properties of cement. **Cement and Concrete Composites**, v. 12, p. 103-108, 1990.

AGGARWAL, L. K.; AGRAWAL, S. P.; THAPLIYAL, P. C.; KARADE, S. R. Cement-bonded composite boards with arhar stalks. **Cement and Concrete Composites,** v. 30, n. 1, p. 44-51, 2008.

AHN, W. Y.; MOSLEMI A. A. SEM examination of wood-Portland cement bonds. **Wood Science,** v. 13, n. 2, p. 77-82, 1980.

ALBERTO, M. M.; MOUGEL, E.; ZOULALIAN, A. Compatibility of some hardwoods species with Portland cement using isothermal calorimetry. **Forest Product Journal**, v. 50, n. 9, p. 83-88, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C266-04:** standard test method for time of setting of hydraulic cement paste by Gillmore needles. [*S.l.:s.n.*], 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C39/C39M-04:** standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. [*S.l.:s.n.*], 2004.

ANGST, U.; ELSENER, B.; LARSEN, C. K.; VENNESLAND, O. Critical chloride content in reinforced concrete - a review. **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 1122-1138, 2009.

ASHORI, A.; TABARSA, T.; SEPAHVAND, S. Cement-bonded composite boards made from Poplar strands. **Construction and Building Materials**, v. 26, p.131-134, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5732:** cimento Portland comum. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5738:** concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

AZAMBUJA, R. R.; LILGE, D. S.; SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R. Performance of two types of cement in production of cement bonded wood panels combined with rice hull. **Floresta**. v. 44, n. 4, p. 715-724, 2014.

AZAMBUJA, R. R.; CASTRO, V. G.; VILLAS BOAS, B. T.; PARCHEN, C. F. A.; IWAKIRI, S. Particle size and lime addiction on properties of wood-cement composites produced by the method of densification by vibro compaction. **Ciência Rural**, v. 47, n. 7, 2017.

BACKE, K. R.; LILE, O.B.; LYOMOV, S. K. Characterizing curing cement slurries by electrical conductivity. **SPE Drilling and Completion**, v. 16, n. 4 p. 201- 207, 2001.

BADEJO, S. O. O. Effect of flake geometry on properties of cement-bonded particleboard from mixed tropical hardwood. **Wood Science and Technology,** v. 22. p. 357-370, 1988.

BADEJO, S. O.; OMOLE, A. O.; FUWAPE, J. A.; OYELEYE, B. O. Static bending and moisture response of cement bonded particleboard produced at different levels of percent chemical additive content in board. **Nigerian Journal of Agriculture, Food and Environment**. v. 7, n. 4, p. 111-120, 2011.

BERALDO, A. L.; CARVALHO, J. V. Compósito *Eucalyptus grandis* - cimento Portland. **Scientia Forestalis**, v. 65, p. 150-161, 2004.

BEJO, L.; TAKATS, P.; VASS, N. Development of cement bonded composite beams. **Acta Silvatica & Lignaria Hungarica,** v.1, p. 111-119, 2005.

BIBLIS, E.J.; LO, C. Sugar and other wood extractives: effect on the setting of Southern Pine-cement mixtures. **Forest Products Journal**, v. 18, n. 8, p. 28-34, 1968.

BILBA, K.; ARSENE, M. A.; OUENSANGA, A. Sugar cane bagasse fibre reinforced cement composites - part I: Influence of the botanical components of bagasse on the setting of bagasse/cement composite. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, p. 91-96, 2003.

BIRICIK, H.; AKOZ, F.; BERKTAY, I.; TULGAR, A. N. Study of pozzolanic properties of wheat straw ash. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 637-643, 1999.

BLANKENHORN, P. R.; LABOSKY JR. P.; DICOLA, M.; STOVER, L. R. Compressive strength of hardwood-cement composites. **Forest Product Journal**, v. 44, n. 4, p. 59-62, 1994.

BOUSTINGORRY, P.; GROSSEAU, P.; GUYONNET, R.; GUILHOT, B. The influence of wood aqueous extractives on the hydration kinetics of plaster. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 11. p. 2081-2086, 2005.

BUCHANAN, A.H.; LEVINE, S. B. Wood-based building materials and atmospheric carbon emissions. **Environmental Science & Policy**, v. 2, p. 427-437, 1999.

CABANGON, R. J.; CUNNINGHAM, R. B.; EVANS, P. D. Manual strand orientation as a means of improving the flexural properties of wood-wool cement board in the Philippines. **Forest Products Journal**, v. 52, n. 4, p. 53-59, 2002.

CARRION, J. M. P.; RODRÍGUEZ, J. G. H.; ANDA, R. R.; GUZMÁN, J. A. S.; TALAVERA, F. J. F. Determinación de la compatibilidad de mezclas de aserrín de *Pinus* spp y cemento Portland para la potencial manufactura de tableros cemento-madeira. *In:* CARVAJAL, S.; BARRIOS, E. P. **Avances en la Investigación Científica en el Cucba.** Guadalajara: TAGIT, 2008. p. 693-700.

CASTRO, V.; ARAÚJO, R. D.; PARCHEN, C.; IWAKIRI, S. Avaliação dos efeitos de pré-tratamento da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden & Cambage no grau de compatibilidade com cimento Portland. **Revista Árvore,** v. 38, n. 5, p. 935-942, 2014.

CASTRO, V. G.; BRAZ, R. L.; AZAMBUJA, R. R.; LOIOLA, P. L.; IWAKIRI, S.; MATOS, J. L. M. Painéis cimento-madeira de *Eucalyptus saligna* com diferentes aditivos químicos e métodos de formação. **Floresta**, v. 45, n. 2, p. 349-360, 2015.

CASTRO, V. G.; AZAMBUJA, R. R.; BILA, N. F.; PARCHEN, C. F. A.; SASSAKI, G. L.; IWAKIRI, S. Correlation between chemical composition of tropical hardwoods and wood-cement compatibility. **Journal of Wood Chemistry and Technology**, v. 38, n. 1, p. 28-34, 2018.

CASTRO, V. G.; PARCHEN, C. F. A.; IWAKIRI, S. Produção de painéis madeira-cimento pelo método de vibro-compactação. **Ciência da Madeira**, v. 9, n. 3, p.134-142, 2018.

CHEUMANI, Y. A. M.; NDIKONTAR, M.; DE JÉSO, B.; SÈBE, G. Probing of wood-cement interactions during hydration of wood-cement composites by proton low-field NMR relaxometry**. Journal of Material Science**, v. 46, p. 1167-1175, 2011.

COLLEPARDI, M.; MONOSI, S.; MORICONI, G.; PAURI, M. Influence of gluconate, lignosulfonate or glucose on the C3A hydration in the presence of gypsum with or without lime. **Cement and Concrete Research**, v. 14. p. 105-112, 1984.

DEFO, M.; CLOUTIER, A.; RIEDL, B. Wood-cement compatibility of some Eastern Canadian woods by isothermal calorimetry. **Forest Product Journal**, v. 54, n. 10, p. 49-56, 2004.

DEL MENEZZI, C. H. S.; CASTRO, V. G.; SOUZA, M. R. Production and properties of a medium density wood-cement boards produced with oriented strands and silica fume. **Maderas Ciencia y Tecnología**, v. 9, n. 2, p. 105-115, 2007.

ERAKHRUMEN, A. A.; AREGHAN, S. E.; OGUNLEVE, M. B.; LARIND, S. L.; ODEVALE, O. O. Selected physico-mechanical properties of cement-bonded particleboard made from pine (*Pinus caribaea* M.) sawdust-coir (*Cocos nucifera* L.) mixture. **Scientific Research and Essay**, v. 3, n. 5, p. 197-203, 2008.

ESPINOZA HERRERA, R.; CLOUTIER, A. Compatibility of four eastern Canadian woods with gypsum and gypsum-cement binder by isothermal calorimetry. **Maderas: Ciencia y tecnologia**, v. 10, n. 3, p. 275-288, 2008.

EVANS, P. D. An introduction to wood-cement composites. *In:* EVANS, P. D. Wood-cement composites in the Asia-Pacific region. ACIAR, 107., 2002, [*S.l.*]. **Proceedings** [...].[*S.l.:s.n*]. 2002. p. 7-10.

FAN, M. Z.; BONFIELD, P. W.; DINWOODIE, J. M.; BOXALL, J.; BREESE, M. C. Dimensional instability of cement-bonded particleboard: the effect of surface coating. **Cement and Concrete Research**, n. 34, p. 1189-1197, 2004.

FAN, M.; NDIKONTAR, M. K.; ZHOU, X.; NGAMVENG, J. N. Cement-bonded composites made from tropical woods: compatibility of wood and cement. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 135-140, 2012.

FRYBORT, S.; MAURITZ, R.; TEISCHINGER, A.; MULLER, U. Cement bonded composites - a mechanical review. **BioResources,** v. 3, n.2, p. 602-626, 2008.

FUJII, T.; MIYATAKE, A.; SEM-EDXA study on the interface between wood and cement in cement strand slab. **Bulletin of FFPRI**, v. 2, n. 2. p. 93-109, 2003.

FUWAPE, J. A.; OYAGADE, A. O. Bending strength and dimensional stability of tropical wood-cement particleboard. **Bioresource technology,** v. 44, p. 77-79, 1993.

GLASSER, F. P. Fundamental aspects of cement solidification and stabilisation. **Journal of hazardous material**, v. 52, p. 151-170, 1997.

GOBBO, L. A. **Os compostos do clínquer Portland:** sua caracterização por difração de raios-X e quantificação por refinamento de Rietveld. 157 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

GOVIN, A.; PESCHARD, A.; FREDON, E.; GUYONNET, R. New insights into wood and cement interaction. **Holzforschung**, v. 59, p. 330-335, 2005.

GOVIN, A.; PESCHARD, A.; GUYONNET, R. Modification of cement hydration at early ages by natural and heated wood. **Cement and Concrete Composites,** v. 28, p. 12-20, 2006.

HACHMI, M.; MOSLEMI, A. A. Correlation between wood-cement compatibility and wood extractives. **Forest Products Journal**, v. 39, n. 6, p. 55-58, 1989.

HACHMI, M.; MOSLEMI A. A.; CAMPBELL, A. G. A new technique to classify the compatibility of wood with cement. **Wood Science and Technology**, v. 24, p. 345-354, 1990.

HERMAWAN, D.; HATA, T.; KAWAI, S.; NAGADOMI, W.; KUROKI, Y. Effect of carbon dioxide-air concentration in the rapid curing process on the properties of cement-bonded particleboard. **Journal of Wood Science**, v. 48, p. 179-184, 2002.

HOFSTRAND, A. D.; MOSLEMI, A. A., GARCIA J. F. Curing characteristics of wood particle from nine northern Rocky Mountain species mixed with Portland cement. **Forest Products Journal**, v. 34, n. 2, p. 57-61, 1984.

HUANG, C. **Study on the manufacturing technology of cement bonded particleboard using CCA-treated wood.** 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – University of New Brunswick, 1999.

IWAKIRI, S.; PRATA, J. G. Utilização da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii* na produção de painéis de cimento-madeira. **Cerne**, v. 14, n. 1, p. 68-74, 2008.

IWAKIRI, S.; SILVA, L. S.; TRIANOSKI, R.; BONDUELLE, G. M.; ROCHA, V. Y. Avaliação do potencial de utilização da madeira de *Schizolobium amazonicum* "Paricá" e *Cecropia hololeuca* "Embúia" para produção de painéis cimento-madeira. **Cerne,** v. 18, n. 2, p. 303-308, 2012.

JANSSON, M. B.; NILVERBRANT, N. O. Wood extractives *In:* EK, M.; GELLERSTEDT, G.; HENRIKSSON, G. **Pulp and Paper Chemistry and Technology**. Berlim: De Gruyter, 2009. v. 1. p. 147-172.

JONSSON, R.; HURMEKOSKI, E.; HETEMAKI, L.; PRESTEMON, J. What is the current state of forest product markets and how will they develop in the future? *In:* WINKEL, G. **Towards a sustainable European forest-based bioeconomy - assessment and the way forward**. [*S.l.*]: European Forest Intitute, 2017. p. 126-131.

JORGE, F. C.; PEREIRA, C.; FERREIRA, J. M. F. Wood-cement composites: a review. **Holz als Roh und Werkstoff**, v. 62, p. 370-377, 2004.

JUENGER, M. C. G.; JENNINGS, H. M. New insights into the effects of sugar on the hydration and microstructure of cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 393-399, 2002.

KARADE, S. R.; IRLE, M.; MAHER, K. Assessment of wood-cement compatibility: a new approach. **Holzforschung**, v. 57, p. 672-680, 2003.

KARADE, S. R. Optimization of water-cement ratio for determination of wood-cement compatibility. *In:* INTERNATIONAL SEMINAR ON CEMENT AND BUILDING MATERIALS, 9., 2005, New Delhi. **Processing** [...]. New Delhi: NCB, 2005. v. 2. p. 353-360.

KARADE, S. R.; IRLE, M.; MAHER, K. Influence of granule properties and concentration on cork-cement compatibility. **Holz als Roh und Werkstoff**. v. 64, p. 281-286, 2006.

KASIM, A.; SIMATUPANG, M. H. Einflubeiniger tropenholzarten auf die abbindung und druckfestigkeit von gips-hozgemischen. **Holz als Roh und Werkstoff**, v. 47, p. 391-396, 1989.

KILBERT, C. J. **Sustainable construction:** green building design and delivery. 3. ed. [*S.l.*]: John Wiley & Sons, 2013.

LATORRACA, J. V.; IWAKIRI, S.; LELIS, R. C. Efeito Inibidor de cinco espécies florestais sobre a cura do compósito cimento-madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 6, n. 1, p. 76-82, 1999.

LATORRACA J. V.; IWAKIRI S. Efeito da cura a vapor sobre as propriedades mecânicas de painéis cimento-madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 8, n. 1, p. 84-93. 2001.

LEE, A. W. C. Effect of cement/wood ratio on bending properties of cement-bonded Southern Pine excelsior board. **Wood and Fiber Science**, v. 17, n. 3, p. 361-364, 1985.

LEE A. W. C., HONG, Z. Compressive strength of cylindrical samples as an indicator of wood-cement compatibility. **Forest Product Journal**, v. 36, n. 11/12, p. 87-90, 1986.

LEE, A. W. C.; HONG, Z.; PHILLIPS, D. R.; HSE, C. Effect of cement/wood ratios and wood storage conditions on hydration temperature, hydration time, and compressive strength of wood-cement mixtures. **Wood and Fiber Science,** v. 19, n. 3, p. 262-268, 1987.

LIMA, A. J. M.; IWAKIRI, S. Utilização de resíduos de madeira de *Pinus spp*. cinza volante e escória de alto-forno em compósitos cimento-madeira. **Floresta**, v. 42, n. 3, p. 639-650, 2012.

LOPES, Y. L. V.; MORI, F. A.; MENDES, L. M.; LATORRACA, J. V. F.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, G. C. Avaliação do potencial técnico da madeira e casca de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden na produção de painéis cimento-madeira. **Scientia Forestalis**, n. 67, p. 111-122, 2005.

MAAIL, R. S.; UMEMURA, K.; AIZAWA, H.; KAWAI, S. Effect of moisture content on manufacturing cement-bonded particleboard using supercritical CO2. **Journal of Wood Science,** n. 58, p. 31-37, 2012.

MACÊDO, A. N.; LIMA, A. M.; FONSECA, O.; LAVÔR, V. A. Análise estatística do comportamento mecânico à compressão do compósito cimento-madeira. **Revista Matéria,** v. 16, n. 2, p. 658-667, 2011.

MACÊDO, A. N.; SOUZA, A. A. C.; POMPEU NETO, B. B. Chapas de cimento-madeira com resíduos da indústria madeireira da região Amazônica. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 2, p. 131-150, 2012.

MARZUKI, A. R.; RAHIM, S.; HAMIDAH, M.; AHMAD RUSLAN, R. Effects of wood: cement ratio on mechanical and physical properties of three-layered cement-bonded particleboards from *Leucaena leucocephala*. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 23, n. 1, p. 67-72, 2011.

MATOSKI, A.; HARA, M. M.; IWAKIRI, S.; CASALI, J. M. Influence of accelerating admixtures in wood-cement panels: characteristics and properties. **Acta Scientiarum Tecnology**, v. 35, n. 4, p. 655-660, 2013.

MATSUSHITA, Y.; MIYAWAKI, S.; YASUDA, S. Manufacture of wood-cement boards VIII: cement-hardening inhibitory compounds of keyaki (Japanese zelkova, *Zelkova serrata*). **Journal of Wood Science**, v. 49, p. 281-284, 2003.

MILLER, D. P.; MOSLEMI, A. A. Wood-cement composites: effect of model compounds on hydration characteristics and tensile strength. **Wood and Fiber Science,** v. 23, n. 4. p. 472-482, 1991.

MORI, F. A.; LOPES, Y. L. V.; MENDES, L. M.; LATORRACA, J. V. F. Estudo da compatibilidade entre a madeira e a casca de *Eucalyptus grandis* e cimento Portland. **Ciência Florestal**, v. 171, n. 3, p. 257-264, 2007.

MOSLEMI, A. A.; GARCIA, J. F.; HOFSTRAND, A. D. Na evaluation of the rate of heat evolution of Portland cement-Northern Rocky Mountain species. **Wood Fiber and Science,** v. 15, n. 2, p. 164-176, 1983.

MOSLEMI, A. A.; LIM Y. T. Compatibility of Southern hardwood with Portland cement. **Forest Products Journal,** v. 34, n. 7/8, p. 22-26, 1984.

MOSLEMI, A. A.; PFISTER, S. C. The influence of cement/wood ratio and cement type on bending strength and dimensional stability of wood-cement composite panels. **Wood and Fiber Science,** v. 19, n. 2, p. 165-175, 1987.

NA, B.; WANG, Z.; WANG, H.; LU, X. Wood-cement compatibility review. **Wood Research,** v. 59, n. 5, p. 813-826, 2014.

NAZERIAN, M.; GHALEHNO, M. D.; GOZALI, E. Effects of wood species, particle sizes and dimensions of residue obtained from trimming of wood-cement composites on physical and mechanical properties of cement-bonded particleboard. **Wood Material Science and Engineering**, v. 6, p. 196-206, 2011.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Concrete technology**. 2. ed. [*S.l.*]: Pearson Education Limited, 2010. 442 p.

ODLER, I. Hydration, setting and hardening of Portland cement. *In:* LEA, F. M. **The chemistry of cement and concrete**. 4. ed. [*S.l.*]: Elsevier, 2003. p. 157-250.

OKINO, E. Y. A.; SOUZA, M. R.; SANTANA, M. A. E.; ALVES, M. V. S.; SOUZA, M. E.; TEIXEIRA D. E. Physico-mechanical properties and decay resistance of *Cupressus* spp. cement-bonded particleboards. **Cement and Concrete Composites,** v. 27 p. 333-338, 2005.

OLORUNNISOLA, A. O. Effect of husk particle size and calcium chloride on strength and sorption properties of coconut husk-cement composites. **Industrial Crops and Products**, v. 29, p. 495-501, 2009.

OMONIYI, T. E.; AKINYEMI, B. A.; OLAYIWOLA, H. O. Design and production specifications of machine for wood cement composite boards production. **Civil and Environmental Research**, v. 3, n. 13, p. 137-144, 2013.

OYAGADE, A. O. Effect of cement/wood ratio on the relationship between cement bonded particleboard density and bending properties. **Journal Of Tropical Forest Science**, v. 2, p. 211-219, 1990.

OYAGADE, A. O. Compatibility of some tropical hardwood species with Portland cement. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 6, n. 4, p. 387-396, 1994.

PAPADOPOULOS, A. N.; NTALOS, G. A.; KAKARAS, I. Mechanical and physical properties of cement-bonded OSB. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 64, p. 517-518, 2006.

PAPADOPOULOS, A. N. An investigation of the suitability of some Greek wood species in wood-cement composites manufacture. **Holz Roh Werkst**, v. 65, p. 245-246, 2007.

PARCHEN, C. F. A.; IWAKIRI, S.; ZELLER, F.; PRATA, J. G. Vibro-dynamic compression processing of low-density wood-cement composites. **European Journal of Wood Products.** v. 74, p. 75-81, 2016.

PASCA, S. A.; HARTLEY, I. D.; REID M. E.; THRING, R. W. Evaluation of compatibility between beetle-killed lodgepole pine (*Pinus contorta* var. *latifolia*) wood with Portland cement. **Materials,** v. 3, p. 5311-5319, 2010.

PEREIRA, C.; CALCEIRA, F; IRLE, M. A.; FERREIRA, J. M. F. Characterizing the setting of cement when mixed with cork, blue gum, or maritime pine, grown in Portugal I: temperature profiles and compatibility indices. **Journal of Wood Science**. n. 52, p. 311-317, 2006.

PEREIRA, C.; CALCEIRA, F.; FERREIRA, J. M. F.; IRLE, M. A. Characterization of cement-bonded particleboards manufacture with maritime pine, blue gum and cork grown in Portugal. **European Journal of Wood Products**. v. 70, p. 107-111, 2012.

PESCHARD, A.; GOVIN, A.; GROSSEAU, P.; GUILHOT, B.; GUYONNET, R. Effect of polysaccharides on the hydration of cement paste at early ages. **Cement and Concrete Research**. v. 34, n. 11, p. 2153-2158, 2004.

PESCHARD, A.; GOVIN, A.; POURCHEZ, J.; FREDON, E.; BERTRAND, L.; MAXIMILIEN, S.; GUILHOT, B. Effect of polysaccharides on the hydration of cement suspension. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 26, p. 1439-1445, 2006.

PETTERSEN, R. C. The chemical composition of wood. *In:* ROWELL, R. **The chemistry of solid wood. Advances in chemistry series 207**. Washington: American Chemical Society, 1984. p. 57-126.

POURCHEZ J.; GOVIN, A.; GROSSEAU, P.; GUYONNET, R.; GUILHOT, B.; RUOT, B. Alkaline stability of cellulose ethers and impact of their degradation products on cement hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 7, p. 1252-1256, 2006.

PREVITE, R. W.; GRACE, W. R. Some insights on the mechanism of saccharide set retardation of Portland cement. **Cement and Concrete Research,** v. 1, p. 301-316, 1971.

RAMACHANDRAN, V. S.; LOWERY, M. S. Conduction calorimetric investigation of the effect of retarders on the hydration of Portland cement. **Thermochimica Acta,** v. 195, p. 373-387, 1992.

SÁ, V. A.; MENDES, L. M.; COUTO, A. M; LIMA, N. N. Manufatura de painéis cimento-madeira de cedro australiano (*Toona ciliata* M. Roem var. *australis*) de diferentes procedências e idade. **Scientia Forestalis,** v. 38, n. 88, p. 559-566, 2010.

SALMINEM, J. P.; OSSIPOV, V.; HAUKIOJA, E.; PIHLAJA, K. Seasonal variation in the content of hydrolysable tannins in leaves of *Betula pubescens*. **Phytochemistry**, v. 57, p. 15-22, 2001.

SANDERMANN, W.; KOHLER, R. Über eine kurze eignungsprüfung von hölzern für zementgebundene werkstoffe - Studien über mineralgebundene holzwerkstoffe, VI. mitteilung. **Holzforschung**, v. 18, n. 1/2, p. 53-59, 1964.

SANTOS, R. C.; MENDES, L. M.; MORI, F. A.; MENDES, R. F. Aproveitamento de resíduo da madeira de Candeia (*Eremanthus erythropappus*) para produção de painéis cimento-madeira. **Cerne,** v. 14, n. 3, p. 241-250, 2008.

SAVASTANO JR., H.; WARDEN, P. G.; COUTTS, R. S. P. Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites. **Cement and concrete composites**, v. 22, p. 379-384, 2000.

SEMPLE, K. E.; CUNNINGHAM, R. B.; EVANS, P. D. Cement hydration test using wood flour may not predict the suitability of *Acacia mangium* and *Eucalyptus pellita* for manufacture of wood-wool cement boards. **Holzforschung,** v. 53, n. 3, p. 327-332, 1999.

SEMPLE, K. E.; EVANS, P. D. Compatibility of some Australian acacias with Portland cement. **Holz als Roh und Werkstoff**, v. 56, p. 24, 1998.

SEMPLE, K. E.; EVANS, P. D.; CUNNINGHAM, R. B. Compatibility of 8 temperate Australian Eucalyptus with Portland cement. **Holz als Roh und Werkstoff,** v. 58, p. 315-316, 2000.

SEMPLE, K. E.; EVANS, P. D. Screening inorganic additives for ameliorating the inhibition of hydration of Portland cement by the heartwood of *Acacia mangium*. EVANS, P. D. **Wood-cement composites in the Asia-Pacific Region**. Canberra: ACIAR, 2002. p. 29-39.

SEMPLE, K. E.; EVANS, P. D. **Wood-cement composites - suitability of western Australian mallee eucalypt, blue gum and melaleucas.** Barton: RIRDC, 2004. 65 p.

SILVA, A. N.; VIADAURRE, G. B.; ROCHA, J. D. S.; LATORRACA, J. V. F. Biomassa vegetal para uso em chapas de cimento-madeira. **Revista Universidade Rural, Série Ciências da Vida.** v. 22, n. 2, p. 199-203, 2002.

SILVA, G. A.; MENDES, L. M.; TRUGILHO, P. F.; MORI, F. A.; SANTOS, I. F. Umidade de equilíbrio de painéis de madeira. **Revista Árvore,** v. 29, n. 4, p. 639-646, 2005a.

SILVA, G. C.; LATORRACA, J. V. F.; TEXEIRA, D. E.; BORTOLETTO JR., G. Produção do compósito madeira e casca de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake e cimento Portland. **Scientia Forestalis,** v. 68, p. 59-67, 2005b.

SILVA, G. C.; LATORRACA, J. V. F.; LELIS, R. C.; TEXEIRA, D. E.; CARMO, J. F.; FERREIRA, E. S. Produção de painéis de cimento-madeira com adição de diferentes proporções de casca e microssílica. **Ciência Florestal,** v. 16, n. 1, p. 61-70, 2006.

SIMATUPANG, M. H. Der Wasserbedarf bei der Herstellung zementgebunder Holzspanplatten. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 27, p. 379-382, 1979.

SIMATUPANG, M. H.; LANG H.; NEUBAUER A. Einflub der lagerrung von pappel, birke, eiche und lärche sowie des zusatzes von SiO_2-feinstaub auf die biegesfestigkeit zementgebundener spanplatten. **Holz als Roh- und Werkstoff,** v. 45, p. 131-136, 1987.

SIMATUPANG, M. H. Mineral-Bonded Wood Composites. *In:* SCHNIEWIND, A. P. **Concise Encyclopedia of Wood & Wood-Based Materials**. Cambridge: MIT Press, 1989. p. 250.

SIMATUPANG, M. H. Mixed inorganic binder for wood cement composites. **Holz als Roh und Werkstoff**, v. 48, p. 376, 1990.

SIMATUPANG, M. H.; SEDDIG, N.; HABIGHORST, C.; GEIMER, R. L. Technologies for rapid production of mineral-bonded wood composite boards. *In:* MOSLEMI, A. Inorganic bonded wood and fiber composite materials. **Forest Products Research Society,** p. 18-27, 1991.

SIMATUPANG, M. H.; SCHMITT, U. Wood extractives of rubberwood (*Hevea brasiliensis*) and their influences on the setting of the inorganic binder in gypsum-bonded particleboards. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 6, n. 3, p. 269-285, 1992.

SIMATUPANG, M. H.; HABIGHORST, C.; LANGE, H.; NEUBAUER, A. Investigations on the influence of the addition of carbon dioxide on the production and properties of rapidly set wood-cement composites. **Cement & Concrete Composites**, v. 17, p. 187-197, 1995.

SIMATUPANG, M. H. Addition of metakaoline to Portland cement, influence on hydration and properties of cement-bonded wood composites. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 56, p. 215-216, 1998.

SILVÉRIO, F. O.; BARBOSA, L. C. A.; GOMIDE, J. L.; REIS, F. P.; PILÓ-VELOSO, D. Metodologia de extração e determinação do teor de extrativos em madeiras de Eucalipto. **Revista Árvore,** v. 30, n. 6, p. 1009-1016, 2006.

SJOSTROM, E.; WESTERMARK, U. Chemical composition of wood and pulps: basic constituents and their distribution. *In:* SJOSTROM, E.; ALÉN, R. **Analytical methods in wood chemistry, pulping and papermaking.** Berlim: [*s.n.*], 1999. p. 1-20.

SKOOG, D.; WEST, D.; HOLLER, F.; CROUCH, S. **Fundamentos de química analítica.** 8. ed. São Paulo: Pioneira; Thomson, 2006.

SOROUSHIAN, P.; WON, J. P.; CHOWDHURY, H.; NOSSONI, A. Development of accelerated processing techniques for cement-bonded wood particleboard. **Cement and Concrete Composites**, n. 25, p. 721-727, 2003.

SOTANNDE, O. A.; OLUWADARE, A. O.; OGEDOH, O.; ADEOGUN P. F. Evaluation of cement-bonded particle board produced from *Afzelia africana* wood residues. **Journal of Engineering Science and Technology**, v. 7, n. 6, p. 732-743, 2012.

SUTIGNO P. Effect of aqueous extraction of wood-wool on the properties of wood-wool cement board manufactured from Teak (*Tectona grandis*). *In:* EVANS, P. D. **Wood-cement composites in the Asia-Pacific Region**. Canberra: ACIAR, 2002. p. 24-28.

STOKKE, D. D.; WU, Q.; HAN, G. **Introduction to wood and natural fiber composites.** West Sussex: John Wiley & Sons, 2014. 297 p.

STUTZMAN, P. Scanning electron microscopy imaging of hydraulic cement microstructure. **Cement & Concrete Composites**. v. 26, p. 957-966, 2004.

TELEMAN, A. Hemicelluloses and pectins. *In:* EK, M.; GELLERSTEDT, G.; HENRIKSSON, G. **Pulp and Paper Chemistry and Technology**. Berlim: De Gruyter, 2009. v. 1. p. 100-120.

THOMAS, N. L.; BIRCHALL, J. D. The retarding action of sugar on cement hydration. **Cement and Concrete Research,** v. 13, n. 6, p. 830-842, 1983.

TONOLI, G. H. D.; RODRIGUES FILHO, U. P.; SAVASTANO JR., H.; BRAS, J.; BELGACEM, M. N.; ROCCO LAHR, F. A. Cellulose modified fibres in cement based composites. **Composites: part A,** v. 40, p. 2046-2053, 2009.

VAICKELIONIS, G.; VAICKELIONIENE, R. The influence of organic and mineral additives on hydration of cement. **Medziagotyra,** v. 9, n. 3, p. 218-223, 2003.

VAICKELIONIS, G.; VAICKELIONIENE, R. Cement hydration in the presence of wood extractives and pozzolan mineral additives. **Ceramics - Silikáty,** v. 50, n. 2. p. 115-122, 2006.

VIEIRA, D. V.; AYALA, K. M.; SOSA, M. C.; RIVERO, C. G. Residuos maderables. Aptitud de nueve especies latifolias de diferentes macizos montños os para la fabricación de ecomateriales. **Revista Forestal Baracoa**, v. 24, n. 1, p. 41 - 47, 2005.

VIEIRA, J. P. **Interacção cimento-superplatificante. Avaliação da estabilidade do comportamento.** 2010. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010.

VILELA, E.; DU PASQUIER, B. Determinación del coeficiente de aptitud de un grupo de maderas para su posible aplicación em la fabricación de tableros de papilla de madera y cemento. **Revista Forestal Venezolana**, v. 11, n. 16, p. 75-84, 1968.

WANG, X.; YU, Y. The compatibility of two common fast-growing species with Portland cement. **Journal of Indian Academy of Wood Science**, v. 9, n. 2, p. 154-159, 2012.

WEATHERWAX, R. C.; TARKOW, H. Effect of wood on setting of Portland cement. **Forest Products Journal**, v. 14, p. 567-570, 1964.

WEATHERWAX, R. C.; TARKOW, H. Effect of wood on setting of Portland cement: decayed wood as an inhibitor. **Forest Products Journal**, v. 17, n. 7, p. 30-32, 1967.

WEI, Y. M.; FUJII, T.; HIRAMATSU, Y.; MIYATAKE, A.; YOSHINAGA, S.; FUJII, T.; TOMITA, B. A preliminary invertigation on microstructural characteristics of interfacial zone between cement and exploded wood fiber strand by using SEM-EDS. **Journal of Wood Science**, v. 50, p. 327-336, 2004.

WEI, Y. M.; TOMITA, B.; HIRAMATSU, Y.; MIYATAKE, A.; FUJII, T. Study of hydration behaviors of wood-cement mixtures: compatibility of cement mixed with wood fiber strand obtained by water-vapor explosion process. **Journal of Wood Science**, v. 48, p. 365-373, 2002.

WEI, Y. M.; TOMITA, B.; HIRAMATSU, Y.; MIYATAKE, A.; FUJII, T.; FUJII, T.; YOSHINAGA, S. Hydration behavior and compressive strength of cement mixed with exploded wood fiber strand obtained by the water-vapor explosion process. **Journal of Wood Science**, v. 49, p. 317-326, 2003.

WEI, Y. M.; ZHOU, Y. G.; TOMITA, B. Hydration behavior of cement-based composite I: evaluation of wood species effects on compatibility and strength with ordinary Portland cement. **Journal of Wood Science**. v. 46, p. 296-302, 2000a.

WEI, Y. M.; ZHOU, Y. G.; TOMITA, B. Study of hydration behavior of wood cement-based composite II: effect of chemical additives on the hydration characteristics and strengths of wood-cement composites. **Journal of Wood Science**. v. 46, p. 444-451, 2000b.

YASUDA, S.; IMA, K.; MATSUSHITA, Y. Manufacture of wood-cement boards VII: cement-hardening inhibitory compounds of hannoki (Japanese alder, *Alnus japonica* Steud.). **Journal of Wood Science**, v. 48, p. 242-244, 2002.

YOUNG, J. F. A Review of the mechanisms of set-retardation in Portland cement pastes containing organic admixtures. **Cement and Concrete Research,** v. 2, p. 415-433, 1972.

YOUNG, R. A. Historical developments in wood chemistry. **SDUJ Faculty of Forestry**, v. 1, p. 1-15, 2008.

SOBRE O AUTOR

Vinicius Gomes de Castro
Doutor em Ciências Florestais (UFPR). Mestre em Ciências Agrárias (Kyoto University). Bacharel em Engenharia Florestal (UnB).

Tijolo, concreto, aço, gesso, o que estes produtos tradicionais de construção possuem em comum? Todos continuam a emitir gás carbônico durante suas vidas úteis. A construção civil é hoje responsável por quase 40% do carbono na nossa atmosfera. Por isso é importante que os produtos que hoje usamos para construir sejam repensados. Compósitos madeira cimento é uma das alternativas promissoras neste sentido. Estes compósitos são formados pela mistura de partículas de madeira, que não só emitem baixo teor de gás carbônico em uso, mas também armazena o carbono durante seu processo de formação enquanto árvore, e cimento, material comum, aceito e de fácil acesso em todo o mundo. A combinação destes produtos gera um compósito com características positivas de ambas as partes, por exemplo, ao mesmo tempo que resistem ao ataque de fungos e cupins, por causa do cimento, são mais leves e elásticos, por causa da madeira. Porém ainda há desafios para a popularização deste material, sendo o principal deles a seletividade da espécie de madeira usada que pode interferir na pega do cimento. Assim, essa obra busca levantar o estado da arte dos estudos sobre esse material para servir de base e inspiração para o desenvolvimento de novas pesquisas e inovações tecnológicas.

ISBN: 978-65-87108-26-1